Kasatkina E. A., Shumilov O. I., Vashenyuk E. V. Solnce kak istoshnik aerozolei v atmosfere [Corpuscular activity of the Sun as a source of aerosols in the stratosphere] // Kosmicheskie issledovaniya, T. 37, No. 2. – 1999. – P. 163-167. (in Russian)

Klimenko V.V., Klimanov V.A., Sirin A.A., Sleptsov A.M. Izmenenie klimata na zapadnoi chasti Rossii v pozdnem golocene [Climate change in the west of the European part of Russia in the late Holocene] // DAN. Geografiya, T. 376. – 2001. – P. 679-683. (in Russian)

УДК 551.510.42

КОНЦЕНТРАЦИЯ, ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ И ИСТОЧНИКИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ГОРОДА ТАШКЕНТ

М.О. АМОНОВ[2*], Б.Э. НИШОНОВ[2], О.М. ОЧИЛОВ[3]

[1] Научно-исследовательский университет “ТИИИМСХ”, m.amonov@tiiame.uz
[2] Научно-исследовательский гидрометеорологический институт, bnishonov@mail.ru
[3] Национальный офис по внедрению инноваций и трансферу технологий

Аннотация. *В статье приведены результаты анализа фильтров от пробоотборников атмосферного воздуха, установленных на метеостанции Ташкент-Обсерватория г. Ташкента. Сбор проб были проведены в так называемом сезоне пыльных бурь в течение трех лет в начале лета и осени. Анализы показывают, что концентрация мелкодисперсных частиц составили летом для $PM_{2.5}$=19,2-38,1 мкг/м^3, для PM_{10}=45,8-86,8 мкг/м^3 и осенью для $PM_{2.5}$=27,1-33,1 мкг/м^3, PM_{10}=65,8-86,8 мкг/м^3. Самая высокая концентрация мелкодисперсных частиц наблюдалась в 2008 году, самая низкая для летнее время 2010 году и для осеннее время в 2009 году. Соотношение $PM_{2.5}/PM_{10}$ в среднем за время проведения экспериментальных исследований изменялось в пределах 0,38-0,46. В статье также приведены результаты микроэлементного анализа фильтров $PM_{2.5}$ в энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре (ED-XRF). Расчеты, выполненные после микроэлементного анализа, показали, что концентрация минеральной пыли составила 31% в 2008 г., 20% в 2009 г. и 24% в 2010 г. от общей массы мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$. Необходимо указать на наличие в составе мелкодисперсных взвешенных частиц атмосферного воздуха таких элементов как Al, Si, Ca, Ce, As, Cr, Pb, Zn, Mn, Ti, Cu и K. Используя эти элементы, определены предполагаемые источники загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами. В статье также изучена траектория воздушных масс в день пылевой бури, отмеченное 28 июня 2008 года. Результаты исследования в статье являются первыми в Узбекистане данными по изучению состава мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе республики.*

Ключевые слова: *атмосферный воздух, загрязнение воздуха, сезон пылевых бур, мелкодисперсные взвешенные частицы, $PM_{2.5}$, PM_{10}, концентрация частиц и минеральной пыли, микроэлементный состав, источники PM, анализ траекторий HYSPLIT, Ташкент.*

Введение. Ташкент, являясь столицей Узбекистана и одним из крупных городов Центральной Азии, в последнее время все больше сталкивается с проблемами загрязнения атмосферного воздуха. При оценке загрязнение атмосферного воздуха указывается на повышенные концентрации в атмосферном воздухе мелкодисперсных взвешенных частиц с диаметром менее 2,5 микрон – $PM_{2.5}$ и менее 10 микрон – PM_{10} (мелкодисперсные частицы от английского particulate matter – PM вошедшее в широкое употребление

[*] Ответственный автор: m.amonov@tiiame.uz, тел.: +998 90 321-34-37

сокращение), которые увеличивают случаи респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний, а также снижают продолжительность жизни и приводят росту преждевременной смертности населения. В дополнение к воздействию на здоровье людей, мелкодисперсные взвешенные частицы также влияют на радиационный баланс системы Земля – атмосфера и, следовательно, воздействуют на погоду и климат, поглощая, отражая и рассеивая солнечное излучение. Учитывая аридный и сухой климат, а также частые пыльные бури [Нишонов и др., 2024], считается, что почвенная (или минеральная) пыль основной компонент PM в Узбекистане. Однако ощущается острая нехватка научных публикаций по количественной оценке содержания минеральной пыли в PM в различных городах в различные времена года. Также актуально изучение микроэлементного состава и источников PM из-за отрицательного влияния отдельных элементов на здоровье человека.

Цель данной работы – изучение концентрации мелкодисперсных взвешенных частиц $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе и их элементного состава, определение доли почвенной (минеральной) пыли, а также предполагаемых источников загрязнения атмосферного воздуха.

Объектом исследования является атмосферный воздух г. Ташкента, **предметом исследования** – концентрация, микроэлементный состав, содержание почвенной пыли и источники мелкодисперсных взвешенных частиц $PM_{2.5}$.

Исходные данные и методы исследования. В 2008-2010 гг. в рамках совместного проекта Ташкентского государственного аграрного университета с Университетом штата Вашингтон (США) авторами статьи было проведено одно из первых исследований по PM с краткосрочным мониторингом $PM_{2.5}$ и PM_{10} в атмосферном воздухе г. Ташкента. Начало лета и осени является своеобразным сезоном пыльных бур в Узбекистане, поэтому отбор проб воздуха был проведен в июне - июле и сентябре - октябре каждого года.

Отбор проб, определение концентрации PM и химический анализ.

Для отбора проб воздуха использовались малообъемные пробоотборники MiniVol TAS (Airmetrics, США), которые были установлены на площадке метеостанции Ташкент-Обсерватория, расположенной на территории нынешнего Агентства гидрометеорологической службы Республики Узбекистан. На этой метеоплощадке были установлены два пробоотборника для $PM_{2,5}$ и один пробоотборник для PM_{10} (рис. 1).

Рис. 1. Пробоотборники воздуха, установленные на метеоплощадке Ташкент-Обсерватория и процесс взвешивания фильтров

Fig. 1. Air samplers installed at the Tashkent Observatory weather station and the filter weighing process

Для сбора PM в пробоотборниках использовались тефлоновые фильтры, кварцевые фильтры (Whatman, США) и фильтры из стекловолокна (Pall Corporation, США) диаметром 47 мм. При работе пробоотборника атмосферный воздух проходит через сепаратор размера частиц, и затем поступает в среду, где находится фильтр. Здесь разделение размеров мелкодисперсных взвешенных частиц достигается за счет работы инерционных импакторов. В пробоотборнике при сборе мелкодисперсных взвешенных частиц правильного размера решающее значение имеет скорость потока воздуха через импактор. Для MiniVol TAS фактическая объемная скорость потока составлял 5 л/мин при условиях окружающей среды и это соответствовал техническим условиям работы пробоотборника. Ротаметр пробоотборника показывал фактическую скорость потока воздуха. Перед использованием и каждый год до начала отбора проб воздуха проводился калибровка ротаметра и поверка пробоотборника. Разница между фактическим потоком воздуха в пробоотборнике и поверочным потоком воздуха соответствовало требованиям и была не более 3%.

В каждом пробоотборнике отбор проб начинался примерно в 8:00 часов утра и продолжительность ежедневного отбора проб составляла 24±0,5 часа. Фильтры до и после отбора проб были взвешены с использованием микровесов XP-26DR (Mettler Toledo, Швейцария), установленных в Научно-исследовательском гидрометеорологическом институте (рис. 1). Кварцевые фильтры перед использованием обжигали в муфельной печи при температуре 600°C в течение 6 часов, чтобы избежать высоких значений содержания органического углерода.

В 2008-2010 годах были проведены шесть сессий отбора проб: 11 июня – 10 июля и 11 сентября – 10 октября 2008 года; 1 июня – 15 июля и 1 сентября – 15 октября 2009 года; 11 июня – 10 июля и 11 сентября – 10 октября 2010 года. За день до начала сеанса отбора проб фильтр помещался в кассету, и кассета хранилась в антистатической пластиковой коробочке. Во время транспортировки между лабораторией и метеоплощадкой, где были установлены пробоотборники, коробки с фильтрами помещались в пластиковые пакеты с застежками-молниями. В конце отбора проб воздуха предыдущая кассета с фильтром заменялась следующей кассетой с фильтром. В лаборатории использованный фильтр извлекался из кассеты для последующего взвешивания, а в кассету помещался новый, предварительно взвешенный фильтр. Использованные фильтры помещались в чашки Петри и хранились в холодильнике ($<10^0$C) до взвешивания. При работе с фильтрами использовался пинцет. В лабораторном журнале для каждого дня отбора проб регистрировались данные пробоотборника, фильтра, даты, начальное время, скорость потока, время остановки и другие.

Используя вес фильтров до и после отбора, а также продолжительность отбора проб и объёмную скорость потока воздуха определялся концентрация PM в атмосферном воздухе. Для обеспечения достоверности и контроля качества после каждых 9-10 проб в каждом пробоотборнике использовались бланк фильтры.

Микроэлементный состав мелкодисперсных частиц был проанализирован с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометров (ED-XRF) Epsilon 4 и Epsilon 5 (Malvern Panalytical) в Институте исследования пустынь (Desert Research Institute) и Вашингтонском университете в Сент-Луисе (Washington University in St.Louis) США [Liu et al., 2023]. Корректировка данных была проведена путем вычитания результатов измерения лабораторных бланк фильтров из результатов измерения образцов фильтра. Концентрация $PM_{10-2,5}$ и концентрации элементов в $PM_{10-2,5}$ были рассчитаны как различия между измерениями в PM_{10} и $PM_{2,5}$.

Определение концентрации пыли. Пыль, часто называемая минеральная или же почвенная, является одним из основных компонентов мелкодисперсных взвешенных частиц и имеет как естественные (например, пустыня), так и антропогенные (например, сельскохозяйственные земли, дороги, строительство и промышленные объекты) источники. Массу минеральной части пыли и, следовательно, ее фракцию в мелкодисперсных частицах невозможно измерить напрямую, поскольку почвенная пыль представляет собой сложную смесь многих минералов, в основном кварца, полевых шпатов, глин, кальцита и оксидов железа, и часто смешивается с не пылевыми частицами, которые также содержат элементы земной коры. Практичным и типичным способом оценки массы минеральной пыли является применение уравнения пыли, где суммируется оксиды основных элементов земной коры с использованием измеренного элементного состава и предположения об общих формах оксидов, связанных с минеральной пылью.

Начиная с 80-х годов прошлого столетия для расчета концентрации минеральной пыли в составе мелкодисперсных взвешенных частиц исследователями было предложено несколько уравнений. Каждое предложенное уравнение имеет свои преимущества и недостатки. При определении концентрации минеральной части пыли нами было использовано уравнение, предложенное относительно недавно и дающее относительно точные данные по пыли с учетом региональных условий [Liu et al., 2022]:

$$КПП = [1{,}89Al \times (1 + MAL) + 2{,}14Si + 1{,}40Ca + 1{,}36Fe + 1{,}67Ti] \times CF$$

где, КПП-концентрация почвенной пыли, здесь постоянными являются коэффициенты окисления, используемые для преобразования элементов в оксиды, MAL - представляет собой массовое соотношение минерала к алюминию, определяемое как $(K_2O+MgO+Na_2O)/Al_2O_3$, а CF - поправочный коэффициент, используемый для учета других отсутствующих соединений, таких как карбонаты. Коэффициенты MAL и CF имеются для шести основных регионов-источников пыли (Ближний Восток, Сахара, Австралия, Восточная Азия и Юго-запад США), но они недоступны для Центральной Азии из-за недостатка данных измерений в регионе - источнике пыли, необходимых для разработки региональных коэффициентов. При определении массы пыли были применены коэффициенты региона с наиболее близким значением коэффициента MAL.

Анализ траектории воздушных масс атмосферы. Анализом траектории воздушных масс атмосферы были изучены области-источники крупных пылевых явлений, характеризующихся высокой концентрацией и фракцией минеральной пыли в составе $PM_{2,5}$. Чтобы идентифицировать пылевые выбросы для этих событий, были получены естественные цветные изображения со спектрорадиометра среднего разрешения (MODIS) спутника Aqua Национального управления по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA), используя веб-сайт NASA Worldview (https://worldview.earthdata.nasa.gov/). Для анализа траектории воздушных масс атмосферы использовали модель HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model - Гибридная модель интегрированной траектории для одиночных частицы с использованием лагранжевого подхода) [Rolph et al., 2017; Stein et al., 2015]. HYSPLIT используется для анализа транспорта, рассеивания и осаждения атмосферных частиц, таких как аэрозоли и пыль, а также траектории пыльных бурь [Nishonov et al, 2023]. Эта модель комбинирует лагранжевый метод с возможностями интеграции данных о метеорологических условиях. Были рассчитаны обратные траектории движения воздушных масс в течение 72 часов с высотами прибытия 50, 100 и 500 м над уровнем земли, используя модель HYSPLIT с привязкой к метеорологическим данным Глобальной системы ассимиляции данных (GDAS) со сеткой с пространственным разрешением 1°.

Чтобы изучить частоту прохождения воздушных масс над основными пустынными районами, также было проведено кластерный анализ обратных траекторий, используя функцию “trajCluster” в пакете “Openair” R, который использует алгоритм разбиения на медоиды [Carslaw, Ropkins, 2012]. Евклидова матрица расстояний использовался для вычисления сходства между различными траекториями.

Анализ главных компонентов. Для качественного изучения потенциальных источников основных элементов и микроэлементов в составе $PM_{2,5}$ был использован метод анализа главных компонентов (PCA) для данных 2010 года. Ковариационная матрица была вычислена, используя стандартизированный набор элементных данных и для определения главных компонентов с помощью этой матрицы были подсчитаны собственные векторы и значения. Были выделены главные компоненты с высокими собственными значениями для объяснения большей части общей дисперсии, для упрощения интерпретации было использовано вращение Varimax. В конечной матрице значение компонентов представляло собой корреляцию между элементами, в то время как общности указывают на дисперсию каждого элемента, объясняемую извлеченными главными компонентами (ГК).

Основные результаты и их обсуждение. Полученные результаты по концентрации PM были частично опубликованы в статьях [Амонов и др., 2009; Amanov et al., 2010]. Учитывая нынешний повышенный интерес к загрязнению атмосферного воздуха мелкодисперсными частицами и неполноту данных в предыдущих публикациях, авторы решили привести в этой статье данные по концентрации PM за все годы исследований, а также данные по элементному составу мелкодисперсных частиц.

Как было отмечена выше, во время мониторинга PM были использованы кварцевые фильтры, тефлоновые фильтры и фильтры из стекловолокна. Кварцевые фильтры в последующем использовались для анализа органического и элементарного углерода, тефлоновые фильтры – для элементного анализа состава PM. Относительно дорогостоящие тефлоновые фильтры дают более достоверные данные по массе PM, поэтому полученные данные по концентрации PM на фильтрах из стекловолокна были скорректированы, используя данные, полученные от тефлоновых и бланковых фильтров.

Таблица 1

24-часовая среднесуточная концентрация PM, мкг/м^3

Table 1

24-hour average daily concentration of PM, µg/m^3

Годы	$PM_{2.5}$		PM_{10}		$PM_{10-2.5}$	
	Летнее	Осеннее	Летнее	Осеннее	Летнее	Осеннее
2008	38,1	33,1	86,8	86,8	48,7	53,7
2009	22,3	27,1	56,5	65,8	34,2	38,8
2010	19,2	31,6	45,8	68,7	26,5	37,1

Анализ показывает, что концентрация мелкодисперсных частиц составила летом для $PM_{2.5}$ = 19,2-38,1 мкг/м^3 и для PM_{10} = 45,8-86,8 мкг/м^3 и осенью для $PM_{2.5}$ = 27,1-33,1 мкг/м^3 и для PM_{10} = 65,8-86,8 мкг/м^3. Самая высокая концентрация мелкодисперсных частиц наблюдалась в 2008 году, самая низкая для летнее время в 2010 году и для осеннее время в 2009 году. Концентрация PM была высокой осенью по сравнению с летним сезоном, за исключением 2008 года. Согласно многолетним наблюдениям Узгидромета, средняя годовая сумма осадков в Ташкенте составляет около

420 мм. 2007-2008 годы были своеобразными засушливыми годами (осадки в Ташкенте составляли 411 мм и 348 мм, соответственно) и наоборот в 2009-2010 годах было больше осадков (588 мм и 499 мм, соответственно). Можно предположить, что это тоже повлияло на концентрацию PM в этих годах. Соотношение $PM_{2.5}/PM_{10}$ в среднем за время проведения экспериментальных исследований изменялась в пределах 0,38-0,46.

Для элементного анализа были использованы тефлоновые фильтры. Количество анализированных фильтров составляло за 2008 год – 15 шт., за 2009 год – 29 шт. и за 2010 год – 30 шт. На рисунке 2 показаны уровни концентрации десяти основных элементов и микроэлементов. Летом 2008 года наблюдались повышенные уровни содержания элементов земной коры, включая Al, Si, K, Ca, Ti, Mn и Fe, что указывает на крупные пылевые явления в течение этого года. Уровни S, Zn и Pb оставались относительно стабильными в разные годы. Есть относительно большие различие в концентрации элементов в летнее и осеннее время года.

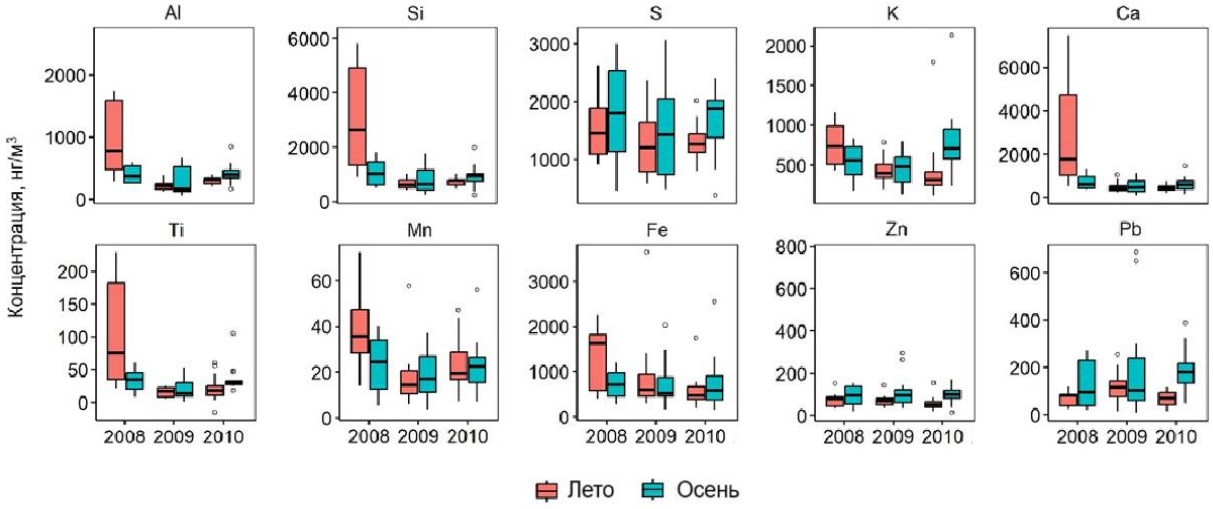

Рис. 2. Концентрация основных элементов и микроэлементов в составе $PM_{2.5}$

Fig. 2. Elemental concentrations of $PM_{2.5}$

Среднее значение коэффициента MAL, используемое при определении концентрации пыли, составляет 0,92, что наиболее близко к региональному значению MAL для Ближнего Востока (0,72) и выше, чем в других регионах с крупными источниками пыли [Liu et al., 2022]. Таким образом, для определения массы пыли в фильтрах были использованы значение 0,72 и поправочный коэффициент CF=1,14 для Ближнего Востока. Высокое значение MAL, полученное после расчетов, указывает на то, что природная пыль в Центральной Азии, вероятно, более щелочная, чем пыль в других регионах-источниках. Наземные измерения состава пыли в пустынях Центральной Азии необходимы для разработки коэффициентов, характерных для Центральной Азии, и более точной оценки массы пыли в этом регионе.

На рисунках 3-4 приведены графики суточных концентраций PM за время проведения экспериментальных исследований.

Расчеты, сделанные после микроэлементного анализа, показывают, что концентрация минеральной пыли в среднем составил 31% в 2008 г., 20% в 2009г. и 24% в 2010 г. от общей массы мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ (рис. 5).

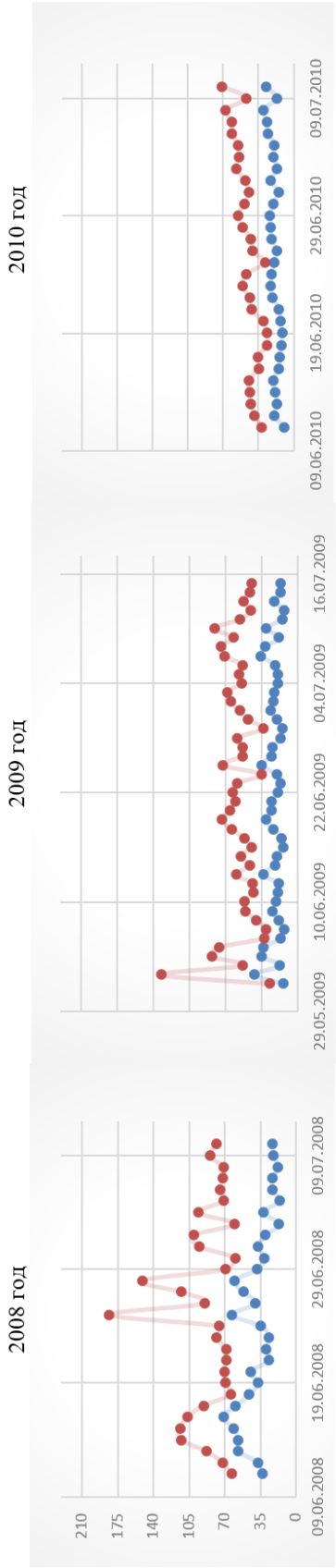

Рис. 3. Суточная концентрация PM в начале лета, мкг/м^3

Fig. 3. Daily concentration of PM in early summer, μg/m^3

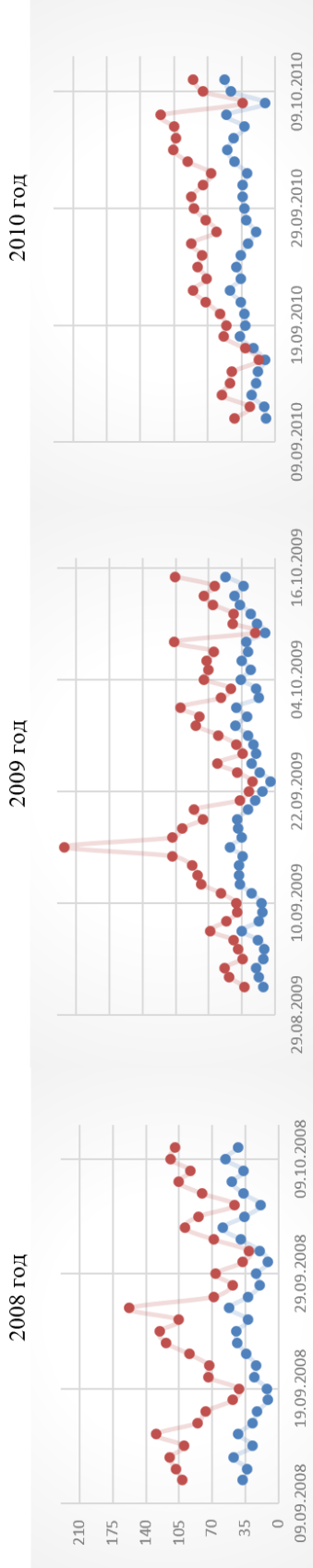

Рис. 4. Суточная концентрация PM в начале осени, мкг/м^3

Fig. 4. Daily concentration of RM in early autumn, μg/m^3

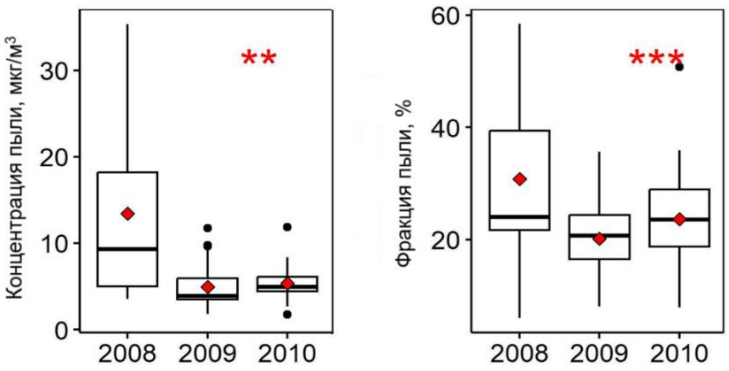

Рис 5. Концентрация и фракция минеральной пыли в составе $PM_{2.5}$

Fig. 5. Mineral dust concentration and fraction in $PM_{2.5}$

Средняя концентрация минеральной пыли в составе $PM_{2.5}$ была равна в 2009 году 4,9 мкг/м^3, в 2010 году 5,3 мкг/м^3 и самое большое значение было в 2008 году – 13,0 мкг/м^3. Как известно, можно контролировать многие источники возникновения PM, но пыль, особенно пустынная, относится одному из трудно контролируемых источников.

Во время проведения экспериментальных исследований наблюдались несколько дней с пыльными бурями и был более подробно изучен день с пыльной бурей – 28 июня 2008 года. В этот день концентрация $PM_{2.5}$ и PM_{10} в атмосферном воздухе г. Ташкент достигло 60,49 мкг/м^3 и 150,77 мкг/м^3 соответственно, а фракция минеральной пыли в составе $PM_{2.5}$ достигло 58%.

Обратные траектории воздушных масс и спутниковые снимки указывают на то, что событие 28 июня 2008 года берет начало с пустыни Аралкумы (рис. 6). На спутниковом снимке, сделанном за день до события, виден столб беловатой солевой пыли, выброшенный из Аралкумов и перенесенный на юго-восток. Обратные траектории для разных высот прибытия схожи и пересекаются с двумя пылевыми облаками.

Результаты кластерного анализа обратных траекторий за весь 2008 год показали (рис. 7), что 25% воздушных масс приходят с северо-запада, проходя над Аралкумами и Кызылкумами, и 13,5% приходят с юго-запада, проходя над Каракумами, что указывает на высокую частоту поступления воздушных масс в Ташкент (~39%) из основных пустынных районов.

Как было указано выше, также проведены качественные исследования с целью определения предполагаемых источников загрязнения воздуха, используя данные элементного состава с фильтров $PM_{2.5}$ 2010 года.

Здесь нужно указать достаточно высокую корреляцию (> 0,75) между следующими элементами: Cu и Zn, Cr и Ce, As и Pb, Mn и Cr, Al/Si и Ca/Cr/Fe, K и Pb. В таблице 2 представлены результаты анализа главных компонентов (PCA) с четырьмя главными компонентами. Эти 4 группы элементов совокупно составляют 81% дисперсии. В ГК1, составляющий 34% дисперсии, преобладают элементы земной коры, представляющие собой выбросы минеральной пыли. В дополнение к природной пыли, антропогенные источники, такие как строительная пыль, также вносят значительный вклад в образование элементов земной коры в атмосферном воздухе Ташкента.

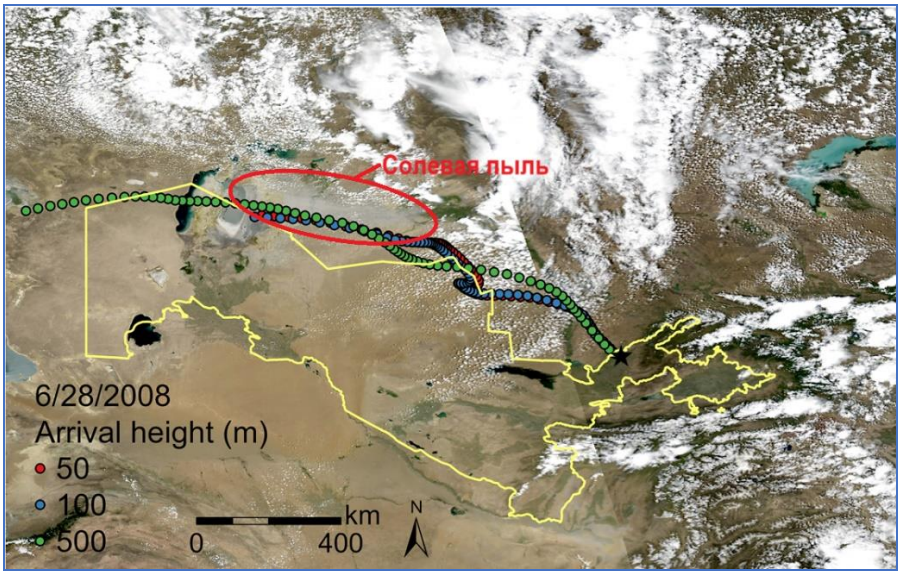

Рис. 6. Обратные траектории воздушных масс по модели HYSPLIT с высотами прибытия 50, 100 и 500 м для пылевого явления, наблюдавшихся в Ташкенте 28 июня 2008 года. Фоновыми изображениями являются снимки MODIS/Aqua, сделанные 27 июня 2008 года (источник: NASA Worldview)

Fig. 6. The HYSPLIT backward trajectories with arrival heights of 50, 100, and 500 m for the dust events observed in Tashkent on June 28, 2008. The background images are MODIS/Aqua images from June 27, 2008 (source: NASA Worldview).

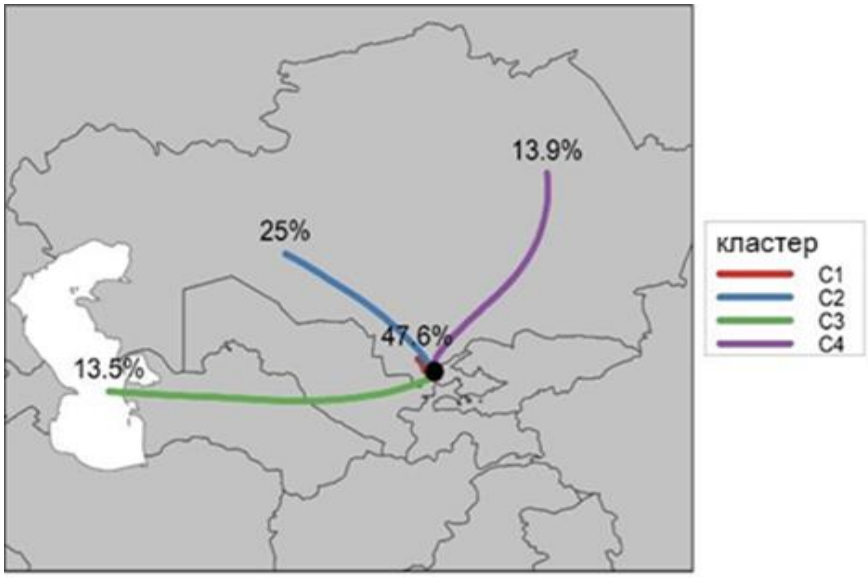

Рис. 7. Средняя траектория кластеров, рассчитанные на основе обратных траекторий HYSPLIT с высотой прибытия 100 м в Ташкенте в 2008 году

Fig. 7. The mean trajectory of each cluster based on HYSPLIT backward trajectories with an arrival height of 100 m to Tashkent in 2008

ГК2, составляющий 24% дисперсии, в значительной степени связан с As, Pb, Zn и Cu, что указывает на возможные источники сжигания угля и на потенциальные выбросы в атмосферу от транспортных средств [Adamiec et al., 2016]. ГК3 включает такие элементы, как Ce, Cr и Mn и доля этого компонента равна 17%. Производство керамических изделий, или же каталитические нейтрализаторы автомобильных двигателей могут быть источниками Ce [Moreno et al., 2013]. С другой стороны, все три элемента являются своеобразными маркерами промышленных предприятий по производству или обработке металлов. В ГК4 источниками элементов Ti и K можно назвать дорожную пыль и сжигание биомассы [Rajput, Trivedi, 2024].

Таблица 2

Матрица компонентов полученных после анализа главных компонентов мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ 2010 года

Table 2

Component matrix of the PCA analysis for $PM_{2.5}$ samples of 2010

Элементы	ГК1	ГК2	ГК3	ГК4	Общность
Pb	0,06	**0,85**	-0,23	0,00	0,78
Ce	-0,17	-0,24	**0,91**	-0,07	0,93
As	-0,09	**0,90**	0,20	-0,19	0,89
Zn	0,22	**0,83**	0,00	0,17	0,77
Cu	-0,08	**0,75**	-0,17	0,22	0,65
Fe	0,32	0,43	-0,22	-0,36	0,46
Mn	0,35	0,16	**0,80**	0,10	0,80
Cr	-0,05	-0,12	**0,89**	-0,06	0,82
Ti	0,48	0,02	0,04	**0,79**	0,86
Ca	**0,93**	-0,01	0,14	0,15	0,91
K	0,50	0,24	-0,19	**0,71**	0,84
Si	**0,94**	-0,01	0,00	0,19	0,92
Al	**0,94**	0,11	-0,06	0,22	0,95
Начальное собственное значение	4,4	3,1	2,2	0,9	
% дисперсии	34	24	17	7	
Совокупный %	34	58	75	81	

Дальнейшее изучение потенциальных источников затруднено из-за отсутствия мелкомасштабной инвентаризации выбросов, а также проб, охватывающих все четыре сезона года.

Заключение. Проведенными исследованиями впервые были получены данные, согласно которых концентрация мелкодисперсных взвешенных частиц в атмосферном воздухе в Ташкенте составляла летом $PM_{2.5}$=19,2-38,1 мкг/м^3 и PM_{10}=45,8-86,8 мкг/м^3 и осенью $PM_{2.5}$=27,1-33,1 мкг/м^3 и PM_{10}=65,8-86,8 мкг/м^3. Соотношение $PM_{2.5}/PM_{10}$ была равно 0,38÷0,46. Увеличение суммы осадков в течение года способствует уменьшению концентрации мелкодисперсных взвешенных частиц в атмосферном воздухе и наоборот, в засушливые годы наблюдается повышение концентрации взвешенных частиц в атмосферном воздухе.

В Ташкенте минеральная (или почвенная) пыль является одним из основных компонентов мелкодисперсных взвешенных частиц в летнее и раннее осеннее время года. Согласно расчетам, полученным после микроэлементного анализа, средняя концентрация

минеральной пыли составил 31% в 2008 г., 20% в 2009 г. и 24% в 2010 г. от общей массы мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе.

Анализ обратных траекторий воздушных масс по модели HYSPLIT и спутниковые снимки указывают на то, что пылевая буря, имевшее место во время экспериментальных исследований 2008 года берёт начало с пустыни Аралкумы. Элементный анализ фильтра $PM_{2.5}$ в день пылевого события (28 июня 2008 года) показывает низкое содержание Fe и повышенное содержание Ca, чем в обычные дни. Результаты кластерного анализа обратных траекторий за весь 2008 год показали, что 25% воздушных масс приходят с северо-запада, проходя над Аралкумами и Кызылкумами, и 13,5% приходят с юго-запада, проходя над Каракумами, что указывает на высокую частоту поступления воздушных масс в г. Ташкент (~39%) из основных пустынных районов.

Микроэлементный анализ фильтров 2010 года показывает на наличие в составе мелкодисперсных взвешенных частиц атмосферного воздуха таких элементов, как Al, Si, Ca, Ce, As, Cr, Pb, Zn, Mn, Ti, Cu и K. Использование метода анализа главных компонентов (PCA) позволило определить предполагаемые источники загрязнения воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами. Источниками загрязнения атмосферного воздуха этими частицами в летнее и раннее осеннее время года является природная, строительная и дорожная пыль, транспортные средства, сжигание угля и биомассы.

Проведение круглогодичных экспериментальных исследований в будущем будет содействовать всестороннему пониманию источников загрязнения атмосферного воздуха, а также поможет при разработке мер борьбы с загрязнением воздуха в Узбекистане и во всем Центральноазиатском регионе.

Благодарности. Исследования выполнены в рамках проектов UZB2-2878-TA-07 «Мониторинг PM_{10}, $PM_{2.5}$ и исследование характеристик загрязнения атмосферного воздуха мелкими частицами в городе Ташкенте», финансированного фондом CRDF и прикладного проекта К7-046 «Разработка методологических основ мониторинга мелкодисперсных взвешенных частиц (PM_{10} и $PM_{2,5}$) в атмосферном воздухе в засушливом климате Узбекистана», финансированного в рамках Государственных научно-технических программ Узбекистана. Авторы статьи выражают благодарность профессору Jay Turner и докторанту Xuan Liu из Вашингтонского университета в Сент-Луисе за оказанную помощь при элементном анализе фильтров 2010 года, а также профессору Candis Claiborn из Университета штата Вашингтон за общее руководство проектом CRDF и содействие при подготовке публикации.

Вклад авторов. М.О. Амонов: обоснование актуальности исследований, постановка задачи, методология, экспериментальные исследования, обработка и анализ данных, написание текста. **Б.Э. Нишонов:** общее руководство, систематизация материала, гравиметрический анализ фильтров, подготовка данных, редактирование текста. **О.М. Очилов:** участие в экспериментальных исследованиях, сбор данных, обработка данных, подготовка графических материалов. Все авторы прочитали и согласны с подготовленной к публикации версией рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

Амонов М., Клейборн К., Нарбаев Н., Нишонов Б. Тошкент шаҳри атмосфера ҳавосидаги майда заррачалар PM_{10} ва $PM_{2.5}$ миқдори, 2008 йилги тадқиқотлар натижалари // Экология хабарномаси. – 2009. – № 9. – С. 36-39.

Нишонов Б.Э., Шардакова Л.Ю., Ахмедова А.Р., Рахматова Н.И. Статистический анализ явления пыльных бурь в городе Ташкент за 1981-2021 годы. // Гидрометеорология и мониторинг окружающей среды. – 2024. – №1. – С. 79-87.

Adamiec E., Jarosz-Krzeminska E., Wieszala R. Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts // Environmental Monitoring and Assessment – 2016. – No. 188. – P.369.

Amonov M., Claiborn C., Narbayev N. Air quality monitoring and PM study results in Tashkent city // Proceedings of the AWMA International Specialty Conference: "Leapfrogging Opportunities for Air Quality Improvement". – 2010. – PP. 181–186.

Carslaw D., Ropkins K. Openair - An R package for air quality data analysis // Environmental Modelling and Software. – 2012. - 27–28. - PP. 52–61.

Liu X., Turner J.R., Hand J.L., Schichtel B.A., Martin R.V. A Global-Scale Mineral Dust Equation // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2022. - 127. e2022JD036937

Liu X., Amonov M., Turner J. Elemental Composition of Fine Particulate Matter in Central Asia: Dust and Trace Elements in Tashkent, Uzbekistan / American Geophysical Union (AGU) conference. San Fransisco, 11-13 December 2023. Paper #1403662.

Moreno T., Karanasiou A., Amato F., Lucarelli F., Nava S., Calzolai G., Chiari M., Coz E., Artíñano B., Lumbreras J., Borge R., Boldo E., Linares C., Alastuey A., Querol X., Gibbons W. Daily and hourly sourcing of metallic and mineral dust in urban air contaminated by traffic and coal-burning emissions // Atmospheric Environment. – 2013. - 68. – PP. 33-44.

Nishonov B.E., Kholmatjanov B.M., Labzovskii L.D., Rakhmatova N., Shardakova L., Abdulakhatov E.I., Yarashev D.U., Toderich K.N., Khujanazarov T., Belikov D.A. Study of the strongest dust storm occurred in Uzbekistan in November 2021 // Sci. Rep. – 2023. – 13. https://www.nature.com/articles/ s41598-023-42256-1, https://doi.org/10.1038/s41598-023-42256-1.

Rajput J.S., Trivedi M.K. Extraction of tracer elements of particulate matter emission source using association rule mining // Atmospheric Pollution Research. – 2024. - 15.6. – P. 102109.

Rolph G., Stein A., Stunder B. Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY // Environmental Modelling and Software. – 2017. - 95. - PP. 210–228.

Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2015. - 96. PP. 2059–2077.

ТОШКЕНТ ШАҲРИ АТМОСФЕРА ҲАВОСИДАГИ МАЙДА ДИСПЕРС ЗАРРАЧАЛАР МИҚДОРИ, МИКРОЭЛЕМЕНТЛАР БЎЙИЧА ТАРКИБИ ВА МАНБАЛАРИ

М.О. АМОНОВ[1*], Б.Э. НИШОНОВ[2], О.М. ОЧИЛОВ[3]

[1] "ТИҚХММИ" Миллий тадқиқот университети, m.amonov@tiiame.uz
[2] Гидрометеорология илмий-тадқиқот институти, bnishonov@mail.ru
[3] Инновацияларни жорий қилиш ва технологиялар трансфери миллий офиси

Аннотация. *Мақолада Тошкент шаҳридаги Тошкент-Обсерватория метеорология станциясига ўрнатилган атмосфера ҳавосидан намуна олувчи қурилмаларда қўлланилган фильтрлар таҳлиллари натижалари келтирилган. Ҳаво намуналари фильтрларга чанг бўронлари юз берадиган мавсумда уч йил давомида, ёз ва куз фаслининг бошланишида олинган. Таҳлил натижаларига кўра, майда дисперс заррачаларнинг ёз ойидаги миқдори* $PM_{2.5}$*=19,2–38,1 мкг/м³ ва* PM_{10}*=45,8–86,8 мкг/м³; куз ойидаги миқдори* $PM_{2.5}$*=27,1–33,1 мкг/м³ ва* PM_{10}*=65,8–86,8 мкг/м³ га тенг бўлган. Майда дисперс заррачаларнинг энг юқори миқдори 2008 йилда кузатилган, энг паст миқдор ёз ойи учун 2010 йилда ва куз ойи учун 2009 йилда қайд этилган. Тажриба тадқиқотлари давомида* $PM_{2.5}/PM_{10}$ *нисбат ўртача 0,38-0,46 оралиғида бўлган. Мақолада, шунингдек, энергия дисперсив рентген флуоресценция спектрометри ёрдамида* $PM_{2.5}$ *таркибини микроэлементлар*

бўйича таҳлили натижалари ҳам келтирилган. Микроэлементлар таҳлилидан кейинги ҳисоблашлар шуни кўрсатдики, $PM_{2.5}$ таркибидаги минерал чанг заррачаларини ўртача улуши 2008 йилда 31%, 2009 йилда 20% ва 2010 йилда 24% ни ташкил этган. Таҳлил шунингдек, $PM_{2.5}$ таркибида Al, Si, Ca, Ce, As, Cr, Pb, Zn, Mn, Ti, Cu ва K каби микроэлементлар мавжудлигини кўрсатди. Мақолада ушбу таҳлил натижаларидан фойдаланиб, ҳаво ифлосланишининг потенциал манбалари ҳам тадқиқ этилган. Мақолада 2008 йил 28 июнда кузатилган чанг бўрони кунида ҳаво массаларининг траекторияси ҳам ўрганилган. Тадқиқот натижалари Ўзбекистонда атмосфера ҳавосини майда дисперс заррачалар ($PM_{2.5}$) таркибини ўрганиш бўйича республикадаги биринчи маълумотлар ҳисобланади.

Калит сўзлар: *атмосфера ҳавоси, ҳавонинг ифлосланиши, чанг бўрони мавсуми, майда дисперс заррачалар $PM_{2.5}$ ва PM_{10}, майда заррачалар ва чанг концентрацияси, микроэлементлар, PM манбалари, траектория орқали таҳлил HYSPLIT, Тошкент.*

CONCENTRATION, ELEMENTAL COMPOSITION AND SOURCES OF PARTICULATE MATTERS IN THE ATMOSPHERIC AIR OF TASHKENT CITY

M.O. AMONOV[1*], B.E. NISHONOV[2], O.M. OCHILOV[3]

[1] "TIIAME" National Research University, m.amonov@tiiame.uz
[2] Hydrometeorological Research Institute, bnishonov@mail.ru
[3] National office for Innovation Implementation and Technology Transfer

Abstract. *The article presents the results of an analysis of filters in atmospheric air samplers installed at the Tashkent Observatory meteorological station in Tashkent city. Air samples was collected during the so-called dust storm season over three years, in early summer and autumn. The analysis shows that the concentration of PM in summer was: for $PM_{2.5}$=19.2–38.1 μg/m³ and for PM_{10}=45.8–86.8 μg/m³; and in autumn: for $PM_{2.5}$=27.1–33.1 μg/m³ and for PM_{10}=65.8–86.8 μg/m³. The highest concentration of PM was observed in 2008, while the lowest concentration during the summer was recorded in 2010, and during the autumn in 2009. The ratio of $PM_{2.5}$/ PM_{10} during the experimental study varied in range between 0.38 to 0.46. The article also presents the results of the microelement analysis of $PM_{2.5}$ filters by using an energy-dispersive X-ray fluorescence (ED-XRF) instrument. Calculations after microelement analysis shows that the mineral dust concentration accounted for 31% in 2008, 20% in 2009, and 24% in 2010 of the total mass of $PM_{2.5}$. An individual elements analysis show availability in $PM_{2.5}$ elements such as Al, Si, Ca, Ce, As, Cr, Pb, Zn, Mn, Ti, Cu and K. In the paper also discussed the potential sources of air pollution by using principal component analysis. The paper also examines the trajectory of air masses on the day of the dust storm observed on June 28, 2008. The results of the study in the article are the first data in Uzbekistan on the study of the composition of fine particles ($PM_{2.5}$) in the atmospheric air of the republic.*

Keywords: *atmospheric air, air pollution, dust season, fine and course particulate matters $PM_{2.5}$ and PM_{10}, particle and dust concentration, trace elements, PM sources, HYSPLIT trajectory analysis, Tashkent.*

REFERENCES

Amonov M., Cleiborn K., Narbaev N., Nishonov B. Toshkent shahri atmosfera havosidagi mayda zarrachalar PM_{10} va $PM_{2.5}$ mikdori, 2008 yilgi tadqiqotlar natijalari [The concentration of fine particles PM10 and PM2.5 in the atmospheric air of Tashkent city, the results of research on 2008]. // Ekologiya xabarnomasi. – 2009. – № 9. – PP. 36-39. (in Uzbek)

Nishonov B.E., Shardakova L.Yu., Axmedova A.R., Raxmatova N.I. Statisticheskiy analiz yavleniya pilnix bur v gorode Tashkent za 1981-2021 godi [Statistical analysis of dust storm phenomena in Tashkent for 1981-2021].//Gidrometeorologiya i monitoring okrujayushey sredi. – 2024. – No. 1. – S. 79-87. (in Russian)