

УДК 551.521.31(5-191.2)

**ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ И МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
НАНО- И МИКРОМАСШТАБНОГО АЭРОЗОЛЯ
В АТМОСФЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОАЗИАТСКОГО РЕГИОНА**

Б.Б. Чен, С.И. Попель, Г. Филиппе, В.В. Адушкин, Г.А. Когай, П.Г. Вайдлер, Ф. Фридрих

Рассмотрены статистические распределения частиц по сезонам и годам за период 2014–2015 гг. на основе ежедневных средних значений аэрозольной оптической толщины (AOD), параметра Ангстрема (A), среднего косинуса индикатрисы рассеяния (параметра асимметрии g) и альbedo однократного рассеяния (SSA). Установлено, что аккумуляционные моды в распределении частиц по размерам в атмосфере региона присутствуют всегда и могут быть связаны с трансграничным переносом нано- и микромасштабных частиц. В пограничном слое в диапазоне 300 нм – 10 мкм спектры размеров частиц наиболее адекватно описываются логарифмически нормальными распределениями и характеризуют распределения почвенно-эрозийного аэрозоля преимущественно грубой моды.

Ключевые слова: интегральная функция распределения; аэрозоль; модальный радиус; наномасштабные и микромасштабные частицы; аэрозольная оптическая толщина; параметр Ангстрема; параметр асимметрии; альbedo однократного рассеяния; пыль; сажа; сульфаты.

**MAIN OPTICAL AND MICROPHYSICAL PROPERTIES OF NANO- AND
MICRO-SCALE AEROSOL IN THE ATMOSPHERE OF THE CENTRAL ASIA REGION**

B.B. Chen, S. I. Popel, G. Philippe, V. V. Adushkin, G. A. Kogai, P. G. Weidler, F. Friedrich

On the basis of daily average values of the aerosol optical depth (AOD), the Angstrom parameter (A), the mean cosine of the scattering indicatrix (the asymmetry parameter g), and the single scattering albedo (SSA) are considered their statistical distributions by seasons and years for the period 2014–2015. It is established that the accumulation modes in the particle size distribution in the atmosphere of the region are always present and can be associated with transboundary transport of nano- and microscale particles. In the boundary layer in the range of 300 nm -10 μ m, the particle size spectra are most adequately described by log-normal distributions and characterize the soil-erosion aerosol distribution predominantly of the coarse mode.

Keywords: cumulative distribution function; aerosol; particle size distributions; modal radius; nanoscale and microscale particles; the aerosol optical depth; Angstrom parameter; the asymmetry parameter; single scattering albedo; dust; black carbon; sulfates.

Введение. В настоящее время одним из эффективных средств исследования оптических свойств аэрозоля в вертикальном столбе атмосферы является дистанционное радиометрическое зондирование. Так, аэрозольная оптическая толщина (AOD) может быть измерена для оценки аэрозольной нагрузки на атмосферу. А спектральная зависимость AOD, которая выражается параметром Ангстрема, и исследование отношения между AOD и параметром Ангстрема могут быть полезны для различения типов аэрозоля.

Наиболее развитой системой по автоматизации измерений, оперативности получения данных и высокой информативности является сеть аэрозольных наблюдений AERONET [1, 2].

В рамках экспериментальной программы проекта МНТЦ #KR-2105 физические и оптические свойства нано- и микромасштабных аэрозолей были непрерывно измерены с 2014 по 2015 г. в атмосфере Центрального Тянь-Шаня с помощью солнечного фотометра CIMEL сети AERONET.

Регулярные измерения аэрозольной прозрачности атмосферы в регионе с помощью солнечно-

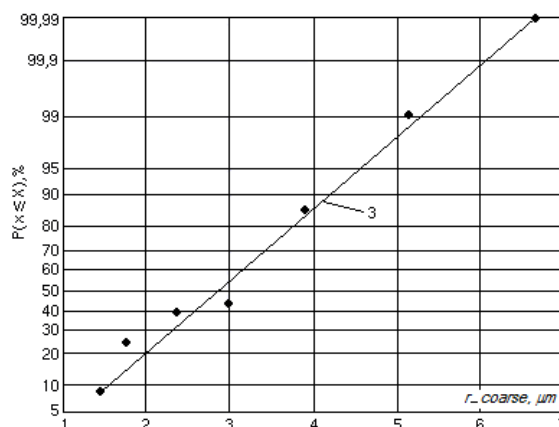
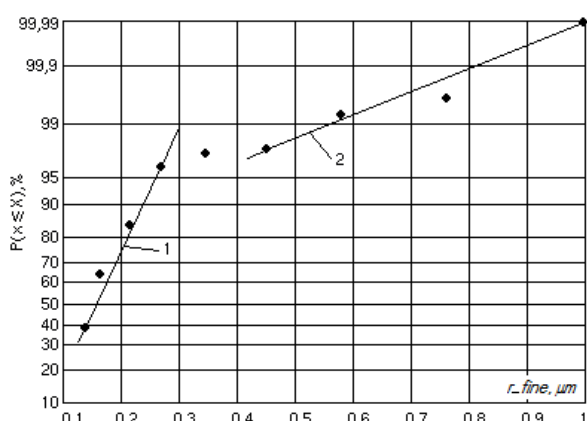


Рисунок 1 – Интегральные функции распределения модальных радиусов частиц. 2014–2015 гг.
Слева – мелкие частицы, справа – крупные

го фотометра CIMEL CE-318 проводятся на сайте ИОА_ЦА КРСУ с июля 2014 г. и с августа 2007 г. – на сайте Иссык-Куль. Полученные данные выставляются на сайте НАСА: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.

Прямая радиация измеряется (каждые 15 мин) на 8 длинах волн ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областей спектра: 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 и 1020 нм, яркость неба в альмукантарате и в главной плоскости Солнца на 4 длинах волн: 440, 670, 870 и 1020 нм в режиме наибольшей достоверности (level 2), в котором исключено влияние облаков [3]. В фотометре используется функция пропускания $P = I/I_0$, где I_0 и I – интенсивности падающей и прошедшей сквозь атмосферу радиации, соответственно, как мера поглощательной в фотометре используется функция пропускания $P = I/I_0$, где I_0 и I – интенсивности падающей и прошедшей сквозь атмосферу радиации. С помощью современных методов решения обратных задач [1–8] по первичным фотометрическим данным восстанавливаются оптические и микрофизические характеристики аэрозоля, усредненные по всей толще атмосферы: параметр Ангстрема, характеризующий спектральную зависимость АОТ; интегральное содержание водяного пара в атмосферном столбе; функция распределения аэрозольных частиц по размерам; комплексный показатель преломления вещества аэрозольных частиц; альbedo однократного рассеяния (SSA).

Целью работы является выявление закономерностей в распределении характеристик нано- и микромасштабного аэрозоля в атмосфере Центральноазиатского региона (Киргизия) для дальнейшего исследования их влияния на перенос радиации через атмосферу и, тем самым, на изменчивость климата атмосферы и подстилающей поверхности.

1. Результаты

Для выявления межгодовых и сезонных изменений основных характеристик аэрозоля рассмотрены их интегральные функции в виде типичных кривых распределения, которые полностью характеризуют случайную величину с вероятностной точки зрения. Рассмотрение статистических распределений характеристик аэрозоля позволило выяснить закон распределения значений этих характеристик как случайных величин и определить ожидаемые значения для заданного процента времени наблюдения.

Распределение частиц по размерам. Анализ распределений частиц по размерам за двухлетний период (2014–2015 гг.) позволил установить, что в большинстве случаев в атмосфере региона преобладают двухмодовые распределения (аккумуляционной и грубой), за редким исключением, когда отмечается только грубое одномодовое распределение.

В функциях распределения частиц по размерам нас интересует, прежде всего, такой параметр, как модальный радиус. Поэтому из выборок величин модальных радиусов (316 и 328 случаев в течение 2014 и 2015 гг. соответственно) были построены интегральные функции распределения модальных радиусов частиц (рисунок 1).

Видно, что распределение частиц по размерам можно рассматривать как суперпозицию распределений частиц по размерам с двумя тонкими модами – с модой Айткена (кривая 1) и аккумуляционной модой (кривая 2) и распределения частиц с грубой модой (кривая 3).

Кривые 1 и 2 показывают распределения наномасштабных частиц (менее 1 μm), а кривая 3 – распределение микромасштабных частиц (от 1 до

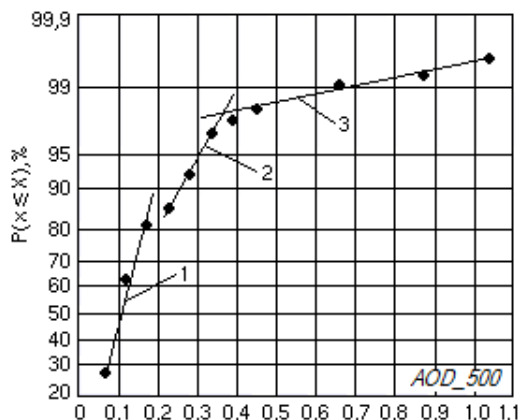
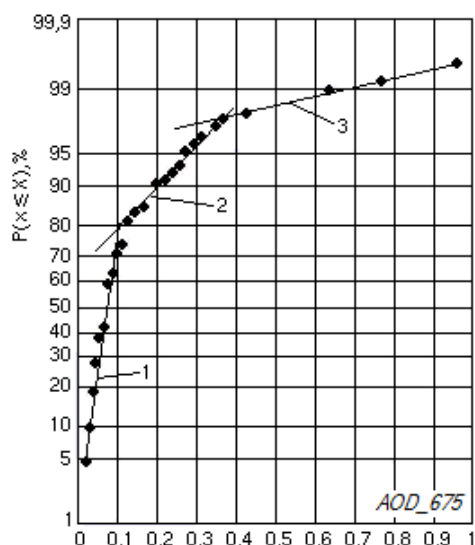


Рисунок 2 – Интегральные функции распределения аэрозольной оптической толщины на $\lambda = 675$ нм (левый рисунок) и $\lambda = 500$ нм (правый рисунок). 2014–2015 гг.

Таблица 1 – Характеристики интегральных функций распределения частиц различных размеров. 2014–2015 гг.

Параметр	Год	Наномасштабные частицы			Смесь (Адгезия)			Микромасштабные частицы		
		средняя	мин	макс	средняя	мин	макс	средняя	мин	макс
AOD_675	2014	0,049±0,025	0,006	0,095	0,158±0,069	0,096	0,336	-		
	2015	0,055±0,021	0,007	0,095	0,174±0,068	0,096	0,344	0,696±0,223	0,428	0,956
	14+15	0,052±0,023	0,006	0,095	0,168±0,068	0,096	0,344	-		
AOD_500	2014	0,078±0,037	0,013	0,163	0,214±0,068	0,123	0,375	-		
	2015	0,088±0,029	0,015	0,150	0,218±0,064	0,129	0,360	0,724±0,244	0,426	0,996
	14+15	0,083±0,033	0,013	0,163	0,216±0,065	0,123	0,375	-		
ASYM_674	2014	0,656±0,057	0,521	0,765	0,653±0,048	0,580	0,781	-		
	2015	0,654±0,06	0,533	0,806	0,695±0,056	0,562	0,794	0,72±0,04	0,685	0,773
	14+15	0,655±0,059	0,521	0,806	0,678±0,057	0,562	0,794	-		
SSA_674	2014	0,881±0,106	0,602	0,995	0,940±0,047	0,753	0,992	-		
	2015	0,877±0,089	0,488	0,994	0,914±0,061	0,758	0,993	0,929±0,038	0,888	0,979
	14+15	0,879±0,097	0,488	0,995	0,925±0,057	0,753	0,993	-		
A_500	2014	1,449±0,265	0,730	2,145	1,259±0,384	0,350	1,750	-		
	2015	1,516±0,292	0,599	2,137	0,942±0,42	0,158	1,736	0,523±0,472	0,081	1,148
	14+15	1,486±0,282	0,599	2,145	1,08±0,432	0,158	1,753	-		

1000 μm). Аккумуляционная мода (кривая 2 на рисунке 1) характеризует, как мы полагаем, промежуточную область частиц между модой Айткена и грубой модой, как переходную от мелких к более крупным, к так называемой смеси частиц, которая может образоваться в результате адгезии.

На рисунке 1 видно, что в диапазоне модальных радиусов до 0.27 μm в течение 96,8 % времени наблюдались мелкодисперсные наномасштабные частицы, а промежуточная область крупнодисперсных наномасштабных частиц, назовем ее областью адгезии, от 0.27 до 0.99 μm – всего лишь в течение 3,2 % времени наблюдений.

Таблица 2 – Процент времени, в течение которых наблюдались частицы разных размеров

Год	Частицы		
	наномасштабные	смесь (Адгезия)	микромасштабные
2014	77.1 (262 дня)	22.9 (78 дней)	-
2015	71.5 (243 дня)	25.3 (86 дней)	3.2 (11 дней)
2014+2015	73.7 (250 дней)	24.5 (83 дня)	1.8 (6 дней)

Распределения характеристик аэрозоля по годам и сезонам. Исходя из рисунка 1, можно полагать, что в интегральных функциях распределения аэрозольной оптической толщи (AOD) можно ожидать подобную картину. И действительно, на рисунке 2 можно выделить три кривые распределения AOD на длине волны 675 нм: кривая 1 – для диапазона AOD от 0.006 до 0.096 в 73,7 % времени наблюдений, кривая 2 – для диапазона от 0.114 до 0.348 в 24,5 % времени и кривая 3 – всего лишь в 1,8 % времени наблюдений в диапазоне AOD от 0.361 до 0.96.

Таблица 3 – Среднесезонные величины ежедневной аэрозольной оптической толщины и альbedo однократного рассеяния, асимметрии и параметра Ангстрема на $\lambda = 674$ нм, 2014–2015 гг.

Параметр	Частица	Весна	Лето	Осень	Зима	2014 г.	2015 г.
AOD_675	Нано	0,052±0,020	0,062±0,019	0,051±0,026	0,039±0,022	0,052±0,019	0,052±0,020
	Адгезия	0,204±0,077	0,145±0,052	0,138±0,035	1 случай	0,248±0,085	0,193±0,073
	Микро	0,649±0,298	1 случай	1 случай	1 случай	1 случай	1 случай
AOD_500	Нано	0,084±0,026	0,097±0,025	0,080±0,038	0,066±0,033	0,086±0,029	0,083±0,025
	Адгезия	0,242±0,074	0,204±0,056	0,186±0,042	1 случай	0,283±0,087	0,232±0,069
	Микро	0,684±0,295	1 случай	1 случай	1 случай	1 случай	1 случай
ASYM_675	Нано	0,715±0,042	0,628±0,038	0,632±0,058	0,685±0,043	0,717±0,027	0,710±0,050
	Адгезия	0,727±0,047	0,648±0,039	0,644±0,036	Нет	0,727±0,051	0,726±0,048
	Микро	0,727±0,044	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
SSA_675	Нано	0,815±0,089	0,923±0,062	0,891±0,115	0,842±0,076	0,795±0,046	0,825±0,101
	Адгезия	0,896±0,06	0,936±0,054	0,957±0,024	Нет	0,913±0,053	0,892±0,062
	Микро	0,909±0,019	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
A_500	Нано	1,417±0,284	1,549±0,281	1,492±0,262	1,431±0,294	1,317±0,265	1,453±0,289
	Адгезия	0,797±0,395	1,241±0,358	1,164±0,441	Нет	0,601±0,285	0,859±0,411
	Микро	0,366±0,268	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

Сравнивая кривые распределений на рисунках 1 и 2, можно полагать, что мелкодисперсным наномасштабным частицам соответствует диапазон AOD_675 от 0.006 до 0.096, области адгезии (крупнодисперсным наномасштабным частицам) – от 0.114 до 0.348 и более крупным микромасштабным частицам – от 0.361 до 0.96.

Проведенный анализ кривых распределения других основных характеристик позволил также установить диапазоны их изменений и время, в течение которых наблюдались нано- и микромасштабные частицы в атмосфере Центральной Азии, и их межгодовую изменчивость (таблицы 1 и 2).

В таблице 2 приведены проценты времени, в течение которых наблюдались частицы разных размеров в атмосфере региона.

Видно, что в рассматриваемые годы преимущественно наблюдались мелкодисперсные и крупнодисперсные наномасштабные частицы в атмосфере региона.

В таблице 3 приведены среднесезонные значения основных характеристик частиц за период 2014–2015 гг. и отдельно по годам.

Аэрозольная оптическая толщина (AOD). Средние величины AOD летом и осенью 2014–2015 гг. составили соответственно 0,062±0,019 и 0,051±0,026 для наномасштабных частиц, 0,145±0,052 и 0,138±0,035 – для смеси наномасштабных частиц. При этом средние величины AOD отдельно за 2014 и 2015 гг. для наномасштабных частиц практически совпадают (0,052±0,019

и $0,052 \pm 0,020$ соответственно), с небольшой разницей для смеси ($0,248 \pm 0,085$ и $0,193 \pm 0,073$).

Весной 2014 г. и 2015 г. наблюдались одинаковые величины AOD, равные соответственно $0,052 \pm 0,019$ и $0,052 \pm 0,020$, как и среднее значение AOD за весенний период 2014–2015 гг., равное $0,052 \pm 0,020$ (таблица 3).

Модальные радиусы частиц. Модальные радиусы наномасштабных частиц изменялись летом 2014 и 2015 гг. соответственно в диапазоне от 0.113 до 0.149 μm и от 0.086 до 0.196 μm , а микромасштабных частиц – от 1.708 до 5.1 μm летом 2014 г. и от 1.302 до 5.1 μm летом 2015 г. В осенний период 2014 г. модальные радиусы наномасштабных частиц наблюдались в диапазоне от 0.086 до 0.356 μm , и в диапазоне от 0.113 до 0.576 μm – осенью 2015 г. В этот период года и в 2014 г., и в 2015 г. модальные радиусы микромасштабных частиц менялись в диапазоне от 1.302 до 6.64 μm .

Модальные радиусы наномасштабных частиц зимой 2014 г. менялись в диапазоне от 0.113 до 0.577 μm , а в 2015 г. – от 0.086 до 0.336 μm . Весной 2014 г. диапазон изменения модальных радиусов наномасштабных частиц более узкий (от 0.148 до 0.256 μm), чем в 2015 г. (от 0.086 до 0.996 μm).

Средний косинус индикатрисы рассеяния (параметр асимметрии g). В летний и осенний периоды 2014–2015 гг. средние величины параметра асимметрии равны соответственно $0,628 \pm 0,038$ и $0,632 \pm 0,058$ и $0,648 \pm 0,039$ и $0,644 \pm 0,036$ для смеси частиц. Средние величины параметра асимметрии отдельно для 2014 и 2015 гг. составили $0,628 \pm 0,038$ и $0,632 \pm 0,058$ для наномасштабных частиц и для смеси частиц $0,648 \pm 0,039$ и $0,644 \pm 0,036$ соответственно летом и осенью. Средние параметры асимметрии отдельно за 2014 и 2015 гг. равны соответственно $0,717 \pm 0,027$ и $0,710 \pm 0,050$ и практически не отличаются между собой для смеси ($0,727 \pm 0,051$ и $0,726 \pm 0,048$). Средняя величина параметра асимметрии в зимний период 2014–2015 гг. составила $0,685 \pm 0,043$ (таблица 3).

Альbedo однократного рассеяния (SSA). Средние величины SSA в летние периоды 2014–2015 гг. равны $0,923 \pm 0,062$ для мелкодисперсных наномасштабных частиц и $0,936 \pm 0,054$ для частиц в области адгезии и осенью ($0,891 \pm 0,115$ и $0,9571 \pm 0,024$ соответственно). Зимой 2014–2015 гг. средняя величина SSA составила $0,842 \pm 0,076$ (таблица 3).

Параметр Ангстрема (A). В летние периоды 2014–2015 гг. средняя величина параметра Ангстрема составила $1,549 \pm 0,281$ и $1,241 \pm 0,358$ (таблица 3). В осенние периоды 2014–2015 гг. величины параметра Ангстрема равны соответственно $1,549 \pm 0,281$ и $1,241 \pm 0,358$. Средняя величина

параметра Ангстрема зимой 2014–2015 гг. равна $1,431 \pm 0,294$ (см. таблицу 3).

2. Анализ результатов

Распределение частиц по размерам. Распределения модальных радиусов частиц можно рассматривать как суперпозицию распределений наномасштабных частиц по размерам с двумя тонкими модами (с модой Айткена и аккумуляционной модой) и распределения микромасштабных частиц с грубой модой. В диапазоне модальных радиусов от 0.04 до 0.268 μm за рассматриваемый период в течение 96,8 % времени наблюдались мелкодисперсные наномасштабные частицы, а промежуточная область крупнодисперсных наномасштабных частиц (область адгезии) от 0,34 до 0.996 μm – всего лишь в течение 3,2 % времени наблюдений. Микромасштабные частицы в диапазоне радиусов от 1.3 до 6.7 μm отмечены в остальное время. Это видимо, связано с тем, что в течение года наблюдается перенос мелкодисперсных частиц PM 2.5 в 67,7 % времени в нижней и в 93,5 % времени – в средней тропосфере.

Эти особенности в распределении частиц по размерам в атмосфере Центральной Азии несколько отличаются от типичных распределений, например, полученных на юго-западе Италии [9], где преобладает бимодальная модель с аккумуляционной модой в диапазоне 0,27 μm – 0,39 μm и грубой модой с центром на 2,4 μm , хотя в некоторых случаях зафиксирована и мультимодальная модель с более чем тремя модами: две сверхтонкие на 0,055 μm и 0,093 μm и одна грубая на 6,6 μm .

Аккумуляционные моды в распределении частиц по размерам в атмосфере региона присутствуют всегда и могут быть связаны с трансграничным переносом наномасштабных и микромасштабных частиц с холодными вторжениями с севера и северо-запада, в основном, в теплую половину года. Важным фактором является также перенос с процессами широтной направленности в холодную половину года и в весенний период, когда над регионом чаще всего располагается юго-западная периферия антициклона, характеризующаяся процессом оседания и полным отсутствием или минимумом процесса подъема. Некоторые авторы [10, 11] связывают такие распределения по размерам с местными источниками пыли (например, почвенная пыль).

Грубая мода с центром мод в диапазоне от 1.3 до 6.7 μm , характеризующая в атмосфере региона наличие микромасштабных частиц, присутствует не всегда (за период 2014–2015 гг. зафиксировано всего несколько случаев) и может быть обусловлена местными источниками, связанными

с особенностями циркуляции в горах. Так, в [12] показано, что при развитой горно-долинной циркуляции в случае неоднородной механической турбулентности перенос аэрозольных структур во всем пограничном слое (днем вынос, ночью оседание) в основном осуществляется за счет возникающих коротких внутренних волн, которые быстро затухают за счет вязкости среды. При конвективной турбулентности, которая развита в переходные периоды при смене циркуляции, характерны большие размеры вихрей, чем при механической турбулентности, и спектр потока аэрозольной массы приходится на более низкие частоты.

Что касается распределения частиц по размерам в пограничном слое, то проведенный статистический анализ позволил установить [7], что в диапазоне 300 нм – 10 мкм спектры размеров частиц наиболее адекватно описываются логарифмически нормальными распределениями с медианным диаметром $D_m = 3.2$ мкм и дисперсией логарифма диаметра $\sigma^2 = 0.83$; $D_m = 2.7$ мкм и $\sigma^2 = 0.63$ и $D_m = 2.5$ мкм и $\sigma^2 = 0.71$. Эти аппроксимации дают близкие значения с данными [13], характеризующими распределения почвенно-эрозионного аэрозоля преимущественно грубой моды в районе эксперимента в Таджикистане в 1989 г., что указывает на аналогичное происхождение минеральной пыли и ее наличие в пограничном слое региона.

Аэрозольная оптическая толщина. AOD позволяет установить дисперсность частиц в атмосфере. Так, например, пылевой аэрозоль в атмосфере региона в основном состоит из мелкодисперсной фракции. При одинаковой средней годовой величине 0.052 ± 0.019 в 2014 г. и 0.052 ± 0.020 в 2015 г. значения AOD₆₇₅ для мелкодисперсных наномасштабных частиц менялись от 0.052 ± 0.020 весной до 0.039 ± 0.022 зимой и от 0.062 ± 0.019 летом до 0.051 ± 0.026 осенью. Зимой в 98,7 % времени наблюдения, весной – в 98,1 %, летом – в 65,2 %, а осенью в 78,6 % времени в атмосфере региона наблюдаются мелкодисперсные наномасштабные частицы. В остальное время в атмосфере наблюдалось присутствие крупнодисперсных наномасштабных частиц, образовавшихся в результате адгезии в диапазоне AOD от 0.052 до 0.096.

Значения AOD для длины волны 500 нм (см. таблицу 3) весной для региона значительно отличаются от сезонных значений в марте, апреле и мае 2009 г., полученных в обсерватории университета Ланьчжоу [8] и равной 0,40. Это свидетельствует о том, что атмосфера в регионе обычно содержит мелкодисперсные наномасштабные частицы в отличие от Северо-Западного Китая.

Наблюдающийся сезонный цикл AOD несколько отличается от сезонного цикла по данным измерения с помощью солнечного фотометра сети AERONET над восточной Азией [14], где максимум наблюдается весной, а минимум – в осенне-зимний период. Наблюдающийся максимум над восточной Азией весной связан с пылью и антропогенными выбросами, а над исследуемым регионом летний максимум связан не только с пылью, но и с значительным вкладом застойных синоптических процессов (периферии антициклона). По данным наблюдений также с помощью фотометра сети AERONET над Душанбе (Таджикистан) наиболее высокие значения AOD отмечены летом, когда чаще всего наблюдались пыльные бури или пылевая мгла, а минимум AOD был отмечен весной [15]. Эти результаты согласуются с ранее полученными данными в пустыне Сахара [16] и в Индии [17].

Параметр асимметрии. Средние величины параметра асимметрии в летний и осенний периоды ($0,628 \pm 0,038$ и $0,632 \pm 0,058$ соответственно) говорят о присутствии в атмосфере преимущественно мелкодисперсных наномасштабных частиц (сажа, сульфаты), а средние значения для смеси частиц ($0,648 \pm 0,039$ и $0,644 \pm 0,036$) – о наличии в атмосфере смеси сажи и сульфатов с пылью. Средние параметры асимметрии отдельно за 2014 и 2015 гг. для наномасштабных частиц равны соответственно $0,717 \pm 0,027$ и $0,710 \pm 0,050$ и практически не отличаются между собой для смеси ($0,727 \pm 0,051$ и $0,726 \pm 0,048$). Микромасштабные частицы отмечены только в одном случае в эти сезоны года.

В 14,3 % времени летом $g = 0.67$ и более (микромасштабные частицы пыли), в 22,3 % – сажа и сульфаты, в 63,4 % времени – смесь сажи и сульфатов с частицами пыли. Осенью в 24,5 % времени величина параметра асимметрии указывает на наличие в атмосфере преимущественно частиц пыли, в 28,6 % – сажи и сульфатов и в 49,5 % времени – смеси сажи и сульфатов с пылевыми частицами.

Средняя величина параметра асимметрии в зимний период 2014–2015 гг. (0.685 ± 0.043) говорит о преимущественном наличии в атмосфере смеси пылевых и сульфатных частиц. При этом в 63,5 % времени наблюдений отмечено наличие в атмосфере частиц пыли пустынь, в 36,5 % – смеси сажи и пылевых частиц.

Весенний период 2014–2015 гг. характеризуется наличием в атмосфере большого содержания смеси пылевых и сажевых частиц, в отличие от зимнего периода. При этом отдельно весной 2014 г., как и весной 2015 г. в атмосфере присутствовала смесь

пылевых и сажевых частиц (таблица 3), как в целом за весь весенний период 2014–2015 гг. практически с одинаковым значением параметра асимметрии, равным 0.72.

Параметр Ангстрема. Величина параметра Ангстрема может указывать на размер частицы. Так, его значения более 2 – это мелкие частицы (например, частицы сажи, сульфатов), а величины меньше чем 1 – крупные частицы как солевые и крупнодисперсная пыль. Значения же, близкие к нулю, указывают на преобладание крупных частиц, а величины параметра больше 1 – мелкодисперсных частиц.

Для атмосферы региона средние величины параметра Ангстрема 1.317 ± 0.265 и 0.601 ± 0.85 в 2014 г., 1.453 ± 0.289 и 0.8591 ± 0.411 в 2015 г. соответственно, для мелкодисперсных и крупнодисперсных наномасштабных частиц свидетельствуют о том, что на перенос радиации в атмосфере в основном влияют смеси пылевых частиц пустынь с сульфатами и сажей, особенно летом (в 85,7 % времени) и осенью (в 77,5 % времени наблюдений). Величины параметра Ангстрема для мелкодисперсных наномасштабных частиц менялись от 1.431 ± 0.294 зимой до 1.417 ± 0.284 весной и от 1.549 ± 0.281 летом до 1.492 ± 0.262 осенью, а для крупнодисперсных наномасштабных частиц от 0.797 ± 0.395 весной до 1.241 ± 0.358 летом и до 1.164 ± 0.441 осенью. При этом летом в 87,4 % времени, а осенью в более чем 89 % времени в атмосфере преимущественно наблюдалась сажа, смешанная с пылевыми частицами, а в остальное время – сульфаты с пылью. В 89,6 % времени наблюдений атмосфера зимой насыщена преимущественно смесью мелкодисперсных частиц (сажа, сульфаты) с пылевыми частицами. Весной в атмосфере наблюдалась смесь крупнодисперсных и мелкодисперсных частиц и в более чем в 42 % времени наблюдались сульфаты с сажей и в 28,9 % – пылевые частицы с сажей.

Максимальные значения параметра Ангстрема наблюдаются при выносах АВС за счет наличия мелкодисперсных сажевых частиц, тогда как минимальные значения зарегистрированы при выносах пыли, которая в основном представлена крупнодисперсной минеральной компонентой (менее в 1,5 % времени в летнее время и в 10,5 % времени в осенний период).

По данным [15] “значения параметра Ангстрема имеют максимум зимой и минимум летом, что связано с преобладанием крупных частиц летом и осенью в период вторжения пылевой мглы. Зимой и весной атмосфера относительно чистая и преобладает субмикронная фракция частиц, что

приводит к максимальным значениям параметра Ангстрема”, что несколько отличается от сезонных распределений этого параметра в атмосфере рассматриваемого региона. Это различие связано, скорее всего, с содержанием, прежде всего, крупных частиц в атмосфере над Душанбе в период частых появлений пылевой мглы, связанной, как правило, с таким синоптическим процессом, как термическая депрессия. Появление этого процесса в нашем регионе, особенно в высокогорных зонах, минимально в силу малой его вертикальной мощности.

Альbedo однократного рассеяния. При средней годовой величине 0.913 ± 0.053 в 2014 и 0.913 ± 0.053 в 2015 г. величина альbedo однократного рассеяния для мелкодисперсных наномасштабных частиц менялась от 0.815 ± 0.089 весной до 0.842 ± 0.076 зимой и от 0.923 ± 0.062 летом до 0.957 ± 0.024 осенью. Для крупнодисперсных наномасштабных частиц эти величины менялись от 0.896 ± 0.006 весной до 0.936 ± 0.054 летом и до 0.936 ± 0.048 осенью. Зимой наличия этих частиц за время наблюдения не зафиксировано.

Средние величины SSA в летние периоды 2014–2015 гг. характеризуют наличие в атмосфере преимущественно смеси сажи и сульфатов с пылевыми частицами. При этом в 47,3 % летом и в 49,0 % осенью в атмосфере присутствуют сульфаты, а в 20,5 % времени летом и в 28,7 % времени осенью – сажа. В летнее время наблюдалась в смеси пыль в 32,1 % времени наблюдений, а осенью – в 22,4 % времени.

Зимой средние значения SSA свидетельствует о преимущественном наличии в атмосфере смеси пылевых частиц с сульфатами, а весной – смеси пылевых частиц с сажей.

При этом в 75 % (зимой) и 69 % (весной) времени наблюдалась сажа, а в 25,4 % и в 12,6 % – пыль, соответственно в зимнее и весеннее время года. Наименьшие значения SSA наблюдались при выносах сильно-поглощающих частиц типа сажи в составе АВС.

Значения альbedo однократного рассеяния показывают, что на перенос радиации основное влияние оказывают присутствующие в составе загрязнения сажевые частицы и смесь сажи с пылевыми частицами, особенно в зимнее время (в 75 % времени – сажа, а в 25,4 % – пылевые частицы).

Альbedo однократного рассеяния является важным фактором при изучении аэрозольного радиационного форсинга. Сама же величина SSA может быть использована для определения влияния аэрозоля на климат [18]. Так, парниковый эффект создается аэрозолем при $SSA < 0.85$, а антипарниковый эффект – при $SSA > 0.85$.

Следовательно, в 2014–2015 гг. в регионе в среднем наблюдался антипарниковый эффект за счет наличия мелкодисперсных наномасштабных частиц. В то же время в сезонном разрезе влияние этих частиц различное: зимой и весной наблюдался парниковый эффект, а летом и осенью – антипарниковый. Крупнодисперсные наномасштабные частицы в течение всех сезонов создавали антипарниковый эффект.

Заключение. Следует ожидать, что выявленные особенности в распределениях характеристик нано- и микромасштабных частиц будут отражаться и на аэрозольном радиационном форсинге и, следовательно, на влиянии этих частиц на перенос радиации, тем самым на изменчивость климата атмосферы и подстилающей поверхности региона.

Работа выполнена в рамках проекта #KR-2105 Международного научно-технического Центра и сотрудничества КРСУ с Институтом космических исследований РАН по теме “Вселенная”. Авторы выражают признательность главным исследователям сайтов сети AERONET и их сотрудникам, измерения которых использованы в статье, а также инженеру Улукбеку уулу Мурадильбеку за помощь в обработке результатов измерений.

Литература

1. *Dubovik O.* A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements / O. Dubovik and M.D. King // *J. Geophys. Res.* 2000. V.105. P. 20673–20696.
2. *Smirnov A.* Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET data base / A. Smirnov, B.N. Holben, T.F. Eck et al. // *Remote Sens. Environ.* 2000. V. 73. P. 337–349.
3. *Holben B.N.* AERONET’s version 2.0 quality assurance criteria / B.N. Holben, T.F. Eck, I. Slutsker, et al. // *Proc. SPIE.* 2006. 6408. 64080Q.
4. *Dubovik O.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements / B.N. Holben, T.F. Eck, I. Slutsker, et al. // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 9791–9806.
5. *Holben B.N.* AERONET – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization / B.N. Holben, T.F. Eck, I. Slutsker, et al. // *Rem. Sens. Environ.* 1998. V. 66. P. 1–16.
6. *Dubovik O.* Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust / O. Dubovik, A. Sinyuk, T. Lapyonok, et al. // *J. Geophys. Res.*, 2006. V.111. doi: 10.1029/2005JD006619.
7. *Адушкин В.В.* Экспериментальное исследование мелкомасштабных частиц в Атмосферных коричневых облаках / В.В. Адушкин, С.И. Попель, Б.Б. Чен, П.Г. Вайдлер, Ф. Фридрих // Докл. АН. 2012. Т. 447. № 4. С. 440–444.
8. *Liu Y.* Aerosol optical properties and radiative effect determined from sky-radiometer over Loess Plateau of Northwest China / Y. Liu, J. Huang, G. Shi, T. Takamura, P. Khatri, J. Bi, J. Shi, T. Wang, X. Wang and Zhang B. // *Atmos. Chem. Phys.* 11. 2011. 11455–11463.
9. *Calvello M.* Physical and optical properties of atmospheric aerosols by in-situ and radiometric measurements / M. Calvello, F. Esposito, G. Pavese and C. Serio // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. 10. 2195–2208.
10. *Chuaybamroong P.* Aerosol source sampling in a mid-scale city, Gainesville, FL / P. Chuaybamroong, C. Wu and D.A. Lundgren // *Aerosol Air Qual. Res.* 2006. 6. 213–230.
11. *Salma I.* Modal characteristics of particulate matter in urban atmospheric aerosols / I. Salma, M. Dal Maso, M. Kulmala and G. Z’aray // *Micromol Chem J.* 2002. 73, 19–26.
12. *Чен Б.Б.* О периодичностях в динамике аэрозоля в слое активного турбулентного перемешивания / Б.Б. Чен, П.В. Козлов // *Вестник КРСУ.* 2006. Том 6. № 5. С. 71–77.
13. *Андропова А.В.* // *Изв. АН СССР / А.В. Андропова, Б.Д. Белан, Д.А. Джиллетт и др. // Физика атмосферы и океана.* 1992. Т. 28. № 8. С. 798–804.
14. *Kim S.W., Yoon S.C., Kim J., et al.* Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements / S.W. Kim, S.C. Yoon, J. Kim, et al. // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41. P. 1634–1651.
15. *Маслов В.А.* Динамика оптических и микрофизических параметров природного пылевого аэрозоля: дис. ... канд. физ.-мат. наук / В.А. Маслов. Душанбе, 2015. 105 с.
16. *Kubilay N.* Optical properties of mineral dust outbreaks over the northeastern Mediterranean / N. Kubilay, T. Cokacar and T. Oguz // *J. Geophys. Res.* 2003. V.108. (D21). 4666.
17. *Anup K.* Changes in aerosol parameters during major dust storm events (2001–2005) over the Indo-Gangetic Plains using AERONET and MODIS data / Anup K. Prasad and Ramesh P. Singh // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D09208.
18. *Борен К.* Поглощения и рассеяния света малыми частицами / К. Борен, Д. Хафмен. М.: Мир, 1986. 664 с.