

*Свердлик Л.Г.*

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВ АЭРОЗОЛЯ ПО ДАННЫМ  
ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ (AERONET)**

*L.G. Sverdlik*

**IDENTIFICATION OF BASIC AEROSOL TYPES FROM GROUND BASED  
SUNPHOTOMETER MEASUREMENTS (AERONET)**

УДК: 551.521.3

*Приведены результаты фотометрических измерений (AERONET) в 2012 году, которые позволили определить сезонные особенности аэрозольного загрязнения региона; по спектральным оптическим свойствам идентифицированы основные типы аэрозоля.*

*The results of sunphotometer measurements (AERONET) in 2012 are presented, they allowed determining the seasonal characteristics of aerosol pollution in the region; on the spectral optical properties the main types of aerosol are identified.*

**Введение**

Одной из важных задач современных измерений в атмосфере, направленных на получение информации о качестве воздуха, источниках загрязнения и количественных оценках радиационного воздействия на климат [1], является определение типа аэрозоля. Для идентификации частиц атмосферного аэрозоля по их спектральным оптическим свойствам, измеренным методами дистанционного зондирования, в частности солнечными фотометрами (AERONET) [2], предложено несколько различных методов. Часто используется зависимость аэрозольной оптической толщины (AOD) от длины волны ( $X$ ), т.е. показатель Ангстрема, или спектральное различие показателей Ангстрема на парах длин волн (кривизна спектральной зависимости), что позволяет выделить основные типы аэрозоля, но не отражает поглощающие свойства частиц [2,3]. В ряде работ было показано, что информация о физико-химических свойствах аэрозоля может быть получена путем привлечения параметров, характеризующих способность частиц поглощать солнечную радиацию [4,5]. Возможности уменьшения неопределенности при идентификации состава аэрозоля по данным AERONET путем использования показателей Ангстрема, относительного вклада тонкодисперсной фракции и альbedo однократного рассеяния (SSA), а также различных комбинаций спектральной изменчивости рассеяния и поглощения рассмотрены в [3,5]. Примеры успешного применения различных процедур классификации атмосферного аэрозоля по оптико-физической информации многих участков AERONET продемонстрировали перспективность подхода, основанного на различиях спектров поглощения минеральной пыли и частиц аэрозоля, образованных в процессе тлеющего или открытого горения, что связано, главным образом, с влиянием сильно абсорбирующих компонентов: окиси железа

(гематит  $Fe_2O_3$ , гетит  $FeOOH$ ), черного (Black Carbon, BC) и органического (OC) углерода. Частицы, содержащие BC, поглощают во всем солнечном спектре (между 0.4 и 1.0  $\mu m$ ) и имеют самое сильное поглощение в ближней инфракрасной (ИК) области спектра [6], в то время как содержащие органический углерод, сильно поглощают на ультрафиолетовых и видимых длинах волн, но слабо поглощают в ближнем ИК диапазоне длин волн [7,8]. Минеральная пыль, содержащая окись железа, близка по поглощающим свойствам OC, но обладает еще более слабым поглощением в длинноволновой области [3,6]. Характерные изменения поглощательной способности демонстрируют также смешанные составы, состоящие из разновидности частиц, образованных различными источниками.

В настоящей статье для идентификации типа аэрозольных частиц было использовано различие между альbedo однократного рассеяния на длинах волн 440 нм и 1020 нм ( $dSSA=SSA_{440}-SSA_{1020}$ ) и показатель Ангстрема ослабления ( $EAE_{440-870}$ ), рассчитанный для длин волн 440 нм и 870 нм [9].

**Участок измерения, оборудование и набор данных**

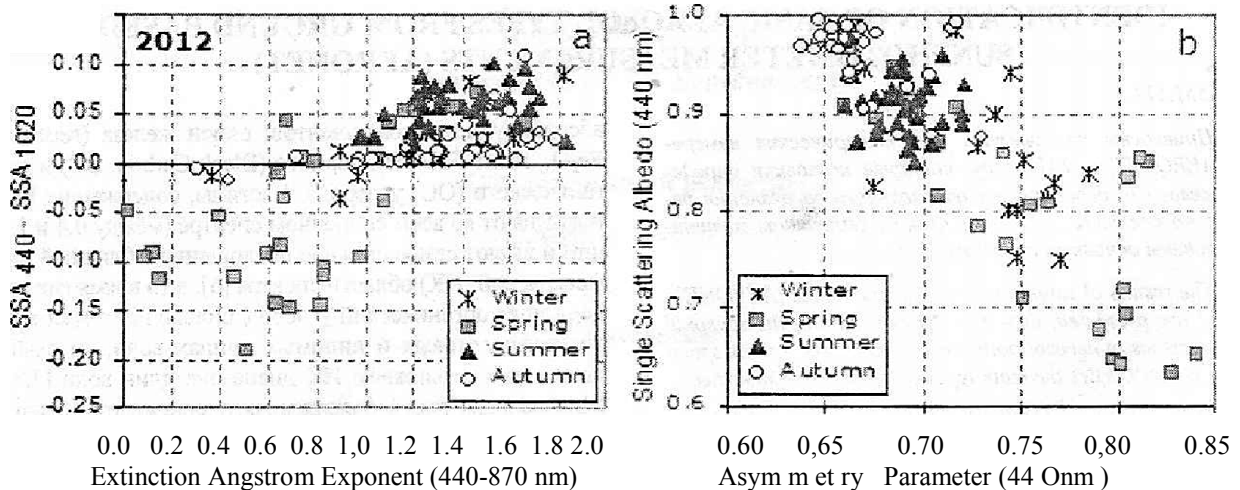
Станция Иссук-Куль (AERONET) расположена на береговой линии озера Иссук-Куль (42.6 N, 77.0 E, 1650м над уровнем моря). На станции установлена стандартная модель солнечного фотометра CIMEL CE 318 с 8 интерференционными фильтрами 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 и 1020 нм. Измерения в солнечном альмукантарате производились четырьмя каналами: 440, 675, 870 и 1020 нм. Подробное описание солнечного фотометра, методологии обработки и проверки качества данных приведены в работах [4,8,10]. В статье использовались данные Уровня 1.5 (применение процедуры фильтрации облаков) прямых измерений солнечной радиации и результаты инверсии (Version 2 Direct Sun Algorithm), которые доступны на официальном сайте AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Выбор Уровня 1.5, имеющего более высокую погрешность восстановления оптических параметров атмосферы (~7-9% для  $A_{00}>0.2$ ), обеспечил лучшую статистику данных. Общее количество точек (дней) измерения в 2012 году составило 578 (123).

**Результаты и обсуждение**

**Сезонные изменения параметров аэрозоля**

Полученные в 2012 году данные характеризовались существенными сезонными изменениями параметров атмосферного аэрозоля. Особенности изменения параметров аэрозоля иллюстрируют представленные различными символами для каждого сезона зависимости спектральной изменчивости альbedo однократного рассеяния ( $SSA_{440}-SSA_{1020}$ ) от показателя

0.15 теля Ангстрема  $EAE_{440-870}$  и  $SSA_{440}$  от параметра асимметрии индикатрисы рассеяния  $ASYM_{440}$  (рис. 1). В течение годового цикла  $dSSA$  показало тенденцию изменения абсорбирующих свойств аэрозоля от более сильного поглощения в коротковолновой области спектра ( $dSSA < 0$ ) до более сильного поглощения на 1020 нм ( $dSSA > 0$ ).



**Рис. 1.** Зависимости среднесуточных значений  $SSA_{440} - SSA_{1020}$  от показателя Ангстрема (a) и  $SSA_{440}$  от параметра асимметрии  $ASYM_{440}$  (b).

Отрицательные значения спектрального различия  $SSA_{440}-SSA_{1020}$  наблюдались преимущественно в весенний период (данные отмечены квадратами), когда под влиянием событий Азиатской пыли в атмосфере доминировали крупные несферические частицы ( $EAE_{440-870} \leq 0.6$ ;  $ASYM_{440}=0.72-0.85$ ), содержащие сильно поглощающую на длине волны 440 нм окись железа [7]. Значения параметра Ангстрема в диапазоне от 0.6 до 1.2 и  $dSSA \approx 0$  характеризуют смешанный тип аэрозоля, состоящий из тонкодисперсного загрязнения и частиц минеральной пыли. При уменьшении вклада крупных частиц пыли ( $1.2 < EAE_{440-870} \leq 1.9$ ;  $ASYM_{440} = 0.63-0.72$ ), поглощение на длине волны 1020 нм становится более существенным и может оцениваться, как уменьшение концентрации окиси железа и увеличение роли BC [9], что наблюдалось в большей части летних, осенних и зимних данных. Все летние измерения (отмечены треугольниками) показали трансформацию спектральной зависимости SSA в сторону увеличения роли углеродсодержащих частиц, что совпадало по времени с периодом наибольшей активности лесных пожаров в России.

**Классификация атмосферного аэрозоля по оптическим данным**

Основываясь на экспериментальных оптических данных и результатах недавних исследований, проведенных в рамках AERONET и изложенных в работах [2, 4, 5, 9], были определены критерии, позволившие дифференцировать аэрозоли не только с учетом размеров частиц, но и их спектральных поглощающих свойств. В частности, данные, которые удовлетворяли условиям  $EAE_{440-870} \leq 0.6$ ;  $0.6 < EAE_{440-870} < 1.2$  и

$EAE_{440-870} \geq 1.2$  были классифицированы как крупный, смешанный и тонкодисперсный аэрозоль, соответственно. Для идентификации смешанного аэрозоля и частиц, образованных в результате сгорания биомассы использовались данные солнечного фотометра со значениями оптической толщины  $AOD_{500} > 0.1$ . Для пылевого аэрозоля критерием отбора было более высокое значение -  $AOD_{500} > 0.2$ . Также было установлено пороговое значение  $SSA=0.96$ , которое использовалось, чтобы различить поглощающие и неабсорбирующие аэрозоли. Отрицательные значения различия  $SSA_{440}-SSA_{1020}$  интерпретировались как более сильное поглощение окисью железа на 440 нм, в то время как положительные значения - как преобладающее поглощение на 1020 нм частицами, содержащими BC (или сажу). Поскольку существенная часть экспериментальных данных (~10%), относящихся к смешанному типу аэрозоля, показала повышенное поглощение во всем спектральном диапазоне ( $0.6 < SSA < 0.8$ ), эти эпизоды были сведены в отдельную группу (Mixed/Abs). Вторую группу этого типа аэрозоля, в соответствии с диапазоном изменения альbedo однократного рассеяния от 0.8 до 0.94, составили умеренно поглощающие частицы (Mixed). В итоге, основываясь на данных фотометрических измерений, были выделены пять основных типов аэрозоля: фоновый (.Background); пылевой (Dust); дымовой или аэрозоль, образованный в результате сгорания биомассы (Bio- mass Burning)-, смешанный (Mixed); смешанный сильно поглощающий аэрозоль (Mixed/Abs).

Результаты классификаций взвешенных в атмосфере частиц, представляющие средние значения и

стандартные отклонения параметров для каждого типа аэрозоля, приведены в Таблице и на рис. 2.

Таблица

Средние ( $\pm$ СКО) значения оптических параметров для выделенных типов аэрозоля

Parameter	Aerosol Type				
	Background	Dust	BB	Mixed	Mixed/Abs
AOD500	0.068±0.038	0.706±0.728	0.130±0.035	0.141±0.036	0.153±0.051
AAOD440	0.001±0.001	0.086±0.088	0.011±0.004	0.013±0.009	0.055±0.018
EAE440.870	1.470±0.242	0.314±0.210	1.536±0.134	1.083±0.160	0.814±0.207
SSA440	0.983±0.010	0.884±0.058	0.920±0.024	0.911±0.045	0.685±0.050
SSA <sub>j</sub> 020	0.971±0.017	0.934±0.052	0.857±0.042	0.888±0.055	0.786±0.054
dSSA440-1020	0.011±0.008	-0.049±0.041	0.064±0.020	0.022±0.027	-0.101±0.073
ASYM440	0.661±0.020	0.745±0.052	0.686±0.018	0.696±0.029	0.794±0.035

На рис. 2 показаны средние значения  $SSA_{440}$ - $SSA_{1020}$  альbedo однократного рассеяния на длине волны 440 нм и показателя Ангстрема ослабления для каждого типа аэрозоля.

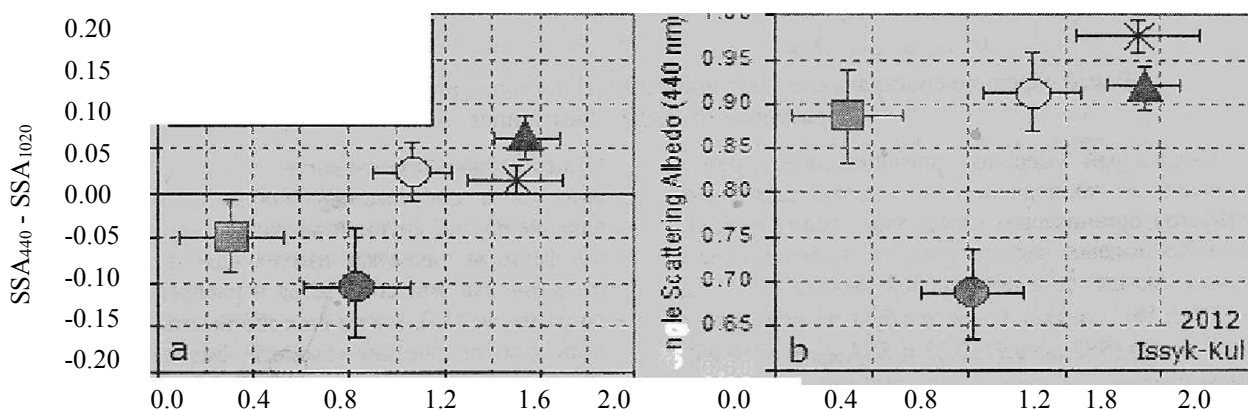


Рис. 2. Зависимости средних значений  $SSA_{440}$  -  $SSA_{1020}$  (a) и  $SSA_{440}$  (b) от показателя Ангстрема ослабления для каждого типа аэрозоля. Вертикальными и горизонтальными линиями показано  $\pm 1$  стандартное отклонение от средних значений.

### Поглощающие свойства основных типов аэрозоля

Результаты проведенного анализа ясно показали различия между типами аэрозоля, что иллюстрирует зависимость от длины волны аэрозольной оптической толщины поглощения и объемные распределения по размерам всех выделенных типов взвешенных в воздухе частиц (рис. 3).

Фоновый или чистый континентальный аэрозоль, состоящий преимущественно из тонкодисперсных частиц ( $EAE_{440.870}=1.5\pm 0.24$ ) сульфатов ( $S_{O4}$ ) с малым содержанием абсорбирующих компонентов [3], имеет самое низкое поглощение ( $AAOD=0.001$ ) по сравнению с другими типами аэрозоля и почти нейтральное поведение спектра SSA ( $SSA_{440}=0.98\pm 0.01$  и  $SSA_{1020}=0.97\pm 0.02$ ). Среднее значение оптической толщины составило  $AOD_{5M}=0.07\pm 0.04$ .

Отчетливое различие зависимости альbedo однократного рассеяния от длины волны наблюдалось в случаях наличия в атмосфере пылевого аэрозоля.

Крупнодисперсные ( $EAE_{440-870}=0.31\pm 0.21$ ) сильно абсорбирующие в коротковолновой области спектра частицы пылевого аэрозоля характеризовались увеличением SSA с

ростом длины волны, ( $SSA_{440} = 0.88\pm 0.06$  и  $SSA_{1020}=0.93\pm 0.05$ ), что совпадает с данными ( $0.88\pm 0.02$  и  $0.95\pm 0.12$ , соответственно), которые приводятся для событий пыли в Индо-Гангском бассейне [11]. Также относительно сильное поглощение частицами Азиатской пыли на коротких длинах волн солнечного спектра ( $SSA_{440}=0.88\pm 0.05$  и  $SSA_{1020}=0.96\pm 0.03$ ) наблюдалось в весенний период на станции SACOL (AERONET) в Китае [7]. В большинстве случаев атмосферная нагрузка пылевого аэрозоля ( $AOD_{500}=0.71\pm 0.73$ ) в несколько раз или на порядок выше, чем в условиях доминирования BC, что приводит к поглощению в солнечном спектре, превышающему поглощение сажей [12].

Спектральные изменения SSA тонкодисперсного ( $EAE_{440-870}=1.54\pm 0.13$ ) умеренно абсорбирующего ( $SSA_{440}=0.92\pm 0.03$ ) дымового аэрозоля показали более сильное поглощение содержащих BC частиц в длинноволновом диапазоне и отрицательный наклон спектра SSA ( $dSSA=0.06\pm 0.02$ ). Относительно высокие средние значения альbedo однократного рассеяния ( $SSA_{440}=0.92\pm 0.03$  и  $SSA_{1020}=0.86\pm 0.04$ ) характерны для дыма лесных и торфяных пожаров в тлеющей стадии [4]. Эти

значения близки данным AEROMET, полученным в условиях задымления атмосферы в районе Томска, которые составили  $SSA_{440}=0.92\pm 0.04$  и

$SSA_{1020}=0.88\pm 0.06$ , и находятся в хорошем согласии с результатами для лесов бореальной зоны США и Канады [13].

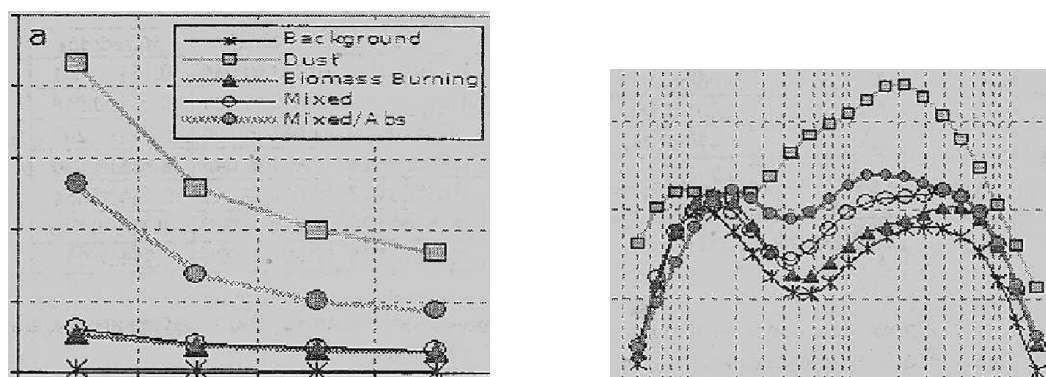


Рис. 3. Средние спектральные зависимости AOD поглощения (а) и объемные распределения по размерам (б) выделенных типов аэрозоля.

Смешанный умеренно поглощающий аэрозоль, состоящий из тонкодисперсных частиц загрязнения (сульфатов, органических материалов, включая OC) [7] и крупных пылевых частиц при более высоком относительном вкладе тонкодисперсной фракции ( $EAE_{440-870}=1.08\pm 0.16$ ), показал более слабую зависимость от длины волны ( $SSA_{440}=0.91\pm 0.05$  и  $SSA_{1020}=0.89\pm 0.06$ ) и низкое среднее значение  $AOD_{500}=0.14\pm 0.04$ . Результирующим влиянием изменения пропорции смешивания в атмосфере пылевого аэрозоля с тонкодисперсными частицами BC и/или OC, когда относительное содержание крупных частиц остается достаточно высоким ( $EAE_{440-870}=0.81\pm 0.21$ ), явилось более сильное поглощение ( $SSA_{440}=0.69\pm 0.05$  и  $SSA_{1020}=0.9\pm 0.05$ ) в диапазоне длин волн 440-1020 нм [10] для категории Mixed/Abs.

Существенное уменьшение альбедо однократного рассеяния в коротковолновой области спектра отражает влияние частиц крупной фракции. В тоже время, другие факторы, такие как изменяющиеся в зависимости от источника эмиссии состав и распределение частиц по размерам [14], могли способствовать наблюдаемым отличиям оптических свойств смешанного сильно поглощающего и пылевого аэрозоля.

Распределение повторяемости типов аэрозоля по сезонам

На рис. 4 представлено распределение по сезонам (зима, весна, лето и осень) числа измерительных дней, в которые доминировала определенная разновидность аэрозоля, а также выраженная в процентах повторяемость каждого типа аэрозоля в годовом цикле.

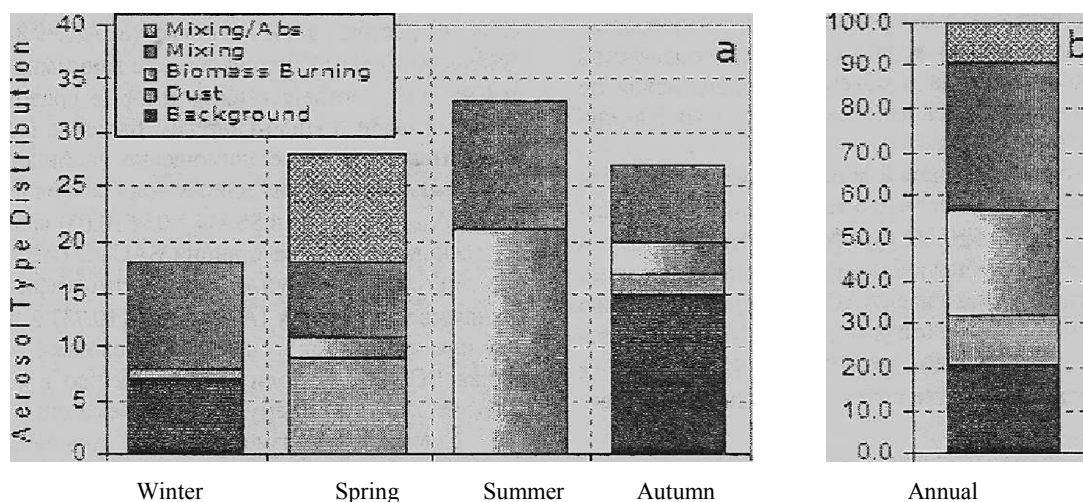


Рис. 4. Сезонное (а) к годовое (б) распределение типов аэрозоля (2012).

Как видно, фоновые состояния атмосферы наблюдались осенью и зимой при максимуме числа дней и содержания в атмосфере сульфатного аэрозоля в октябре. Подавляющее большинство дней проведения измерений, в которые преобладал пылевой и

смешанный сильно поглощающий аэрозоль, приходится на весенний период. Уникальность рассматриваемого годового цикла заключалась в отсутствии сильных штормов пыли в летние месяцы. Поэтому частицы, образованные в результате сгорания био-

массы, являлись доминирующим типом аэрозоля в этот период. Наибольшее воздействие дымового аэрозоля наблюдалось в июне и июле, когда метеорологические условия благоприятствовали интенсивным лесным пожарам в Центральной России. В другие сезоны влияние дымового аэрозоля было незначительным.

Результатом объединенного влияния Азиатской и Ближневосточной пыли, дыма лесных пожаров и местных источников аэрозоля является присутствие в атмосфере сложной смеси различных частиц аэрозоля, которая доминировала в течение года (34% дней проведения измерения).

#### Заключение

Представленные сезонные изменчивости параметров атмосферного аэрозоля в регионе основаны на результатах измерений на НС Иссык-Куль (AERONET) в 2012 году и отражают подверженность региона воздействию различных источников аэрозольного загрязнения. Сильное влияние Азиатской пыли наблюдалось преимущественно в весенние месяцы, а частиц аэрозоля, образованных при лесных и торфяных пожарах, в летний период.

На основе спектральной зависимости ослабления (EAE440.870) и поглощения (dSSA = SSA440-SSAW20), характеризующих доминирующие размеры и поглощающую способность частиц, впервые были определены спектральные характеристики основных типов аэрозоля в регионе

Предварительный анализ результатов измерений показал неплохое согласие с данными наблюдений в других регионах. В тоже время, проведенная классификация типов аэрозоля требует более детального исследования с расширением географической представительности данных и привлечением данных измерений за другие периоды.

#### Литература:

1. Свердлик Л.Г.: Аэрозольное воздействие на перенос радиации и дистанционное лазерное зондирование оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля, Вестник КPCY, Т.5, №7, С.105-108, 2005.
2. Giles D.M., Holben B.N., Eck T.F., Sinyuk A., Smirnov A., Slutsker I., Dickerson R.R., Thompson A.M., Schafer J.S.: An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions, *J. Geophys. Res.*, 117, D17203, 2012.
3. Lee J., J. Kim, C.H. Song, S.B. Kim, Y. Chun, B.J. Sohn, N. Holben: Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements, *Atmos. Environ.*, 44,3110-3117, 2010.
4. Dubovik O., Holben B., Eck T.F., Smirnov A., Kaufman Y.J., Tanre D., Slutsker I.: Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *J. Atmos. Sci.*, 59, 590-608, 2002.
5. Russell P.B., R.W. Bergstrom, Y. Shinozuka, A.D. Clarke, P.F. DeCarlo, J.L. Jimenez, J.M. Livingston, J. Redemann, O. Dubovik, A. Strawa: Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 1155-1169, 2010.
6. Борен К., Хафмен Д.: Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 664 е., 1986.
7. Logan T., Xi B., Dong X., Li Z., Cribb M.: Classification and investigation of Asian aerosol absorptive properties, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 2253-2265, 2013.
8. Eck T.F., Holben B.N., Dubovik O., Smirnov A., Goloub P., Chatenet B., Gomes L., Zhang X.Y., Tsay S.C., Ji Q., Giles D., Slutsker I.: Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. *J. Geophys. Res.*, 110, D06202, 2005.
9. Derimian Y., A. Karnieli, Y.J. Kaufman, M.O. Andreae, T.W. Andreae, O. Dubovik, W. Maenhaut, I. Koren: The role of iron and black carbon in aerosol light absorption, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 3623-3637, 2008.
10. Smirnov A., B.N. Holben, T.F. Eck, O. Dubovik, I. Slutsker: Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET data base, *Remote Sens. Environ.*, 73, 337-349, 2000.
11. Srivastava A.K., S.N. Tripathi, S. Dey, V.P. Kanawade, S. Tiwari: Inferring aerosol types over the Indo-Gangetic Basin from ground based sunphotometer measurements, *Atmospheric Research*, 109-110, 64-75, 2012.
12. Chin M., T. Diehl, O. Dubovik, T. F. Eck, B. N. Holben, A. Sinyuk, D. G. Streets: Light absorption by pollution, dust, and biomass burning aerosols: a global model study and evaluation with AERONET measurements, *Ann. Geophys.*, 27, 3439-3464, 2009.
13. Сакерин С.М., Веретенников В.В, Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М, Насридинов И.М.: Сравнительный анализ радиационных характеристик аэрозоля в ситуациях дымов пожаров и обычных условиях, *Оптика атмосферы и океана*, 23, №6, 2010.
14. Xi X., Sokoiik I.N.: Impact of Asian Dust Aerosol and Surface Albedo on Photosynthetically Active Radiation and Surface Radiative Balance in Dryland Ecosystems, *Advances in Meteorology*, ID 276207, 15 p., doi:10.1155/2012/276207, 2012.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Каримов К.А.