

УДК 551.510.4-047(5-191.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-4-198-206

НАЗЕМНЫЙ МОНИТОРИНГ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В РЕГИОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Л.Г. Свердлов

Аннотация. Приведены результаты измерений оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля солнечным фотометром CIMEL CE-318, размещенным на Полевой Экспериментальной Базе ВГО ФАП КРСУ и НС РАН (станция IAOSA-KRSU, AERONET/PHOTONS). На основе годового цикла наблюдений с сентября 2022 по август 2023 г. определены и проанализированы сезонные особенности аэрозольного загрязнения региона, включая идентификацию источников эмиссии, выделение доминирующих типов частиц и их влияние на радиационный режим атмосферы. Среди особенностей сезонной изменчивости аэрозольной оптической толщины на длине волны 440 нм (AOD_{440}) следует отметить два максимума, которые наблюдались в апреле–мае (0.236 и 0.186) и августе–сентябре (0.127 и 0.150). Минимум сезонных вариаций приходился на декабрь ($AOD_{440}=0.069$). Расчеты показали, что наличие пылевого аэрозоля в 2–5 раз по сравнению с фоновыми условиями увеличивает выхолаживающее воздействие на верхней и нижней границах атмосферы и вызывает нагревание самой запыленной атмосферы.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль; оптическая толщина; пыль; солнечный фотометр; альbedo однократного рассеяния; сезонные вариации.

БОРБОРДУК АЗИЯ ЧӨЛКӨМҮНДӨ АТМОСФЕРАЛЫК АЭРОЗОЛДУК ПАРАМЕТРЛЕРДИН ӨЗГӨРҮШҮНӨ ЖЕР ҮСТҮНДӨ МОНИТОРИНГ ЖҮРГҮЗҮҮ

Л.Г. Свердлов

Аннотация. Макалада КРСУнун жана Россия илимдер академиясынын илимий станциясынын (станция IAOSA-KRSU, AERONET/PHOTONS) Атмосфералык процесстердин физикасынын бийик тоолуу обсерваториясынын эксперименталдык талаа базасында жайгаштырылган CIMEL CE-318 күн фотометри менен атмосфералык аэрозолдун оптикалык жана микрофизикалык мүнөздөмөлөрүн өлчөөлөрдүн натыйжалары келтирилген. 2022-жылдын сентябрынан 2023-жылдын августуна чейинки жылдык байкоо циклинин негизинде чөлкөмдүн аэрозолдук булгануусунун сезондук өзгөчөлүктөрү, анын ичинде эмиссия булактарын аныктоо, бөлүкчөлөрдүн басымдуу түрлөрүн изоляциялоо жана алардын атмосферанын радиациялык режимине тийгизген таасири аныкталды жана талданды. 2022-жылдын сентябрынан 2023-жылдын августуна чейинки жылдык байкоо циклинин негизинде аймактын аэрозолдук булганышынын сезондук өзгөчөлүктөрү, анын ичинде эмиссия булактарын, бөлүкчөлөрдүн басымдуу түрлөрүн жана алардын атмосферанын радиациялык режимине тийгизген таасирин аныктоо жана талдоо жүргүзүлдү. 440 нм (AOD_{440}) толкун узундугунда аэрозолдук оптикалык терендиктин сезондук өзгөрмөлүүлүгүнүн өзгөчөлүктөрүнүн ичинен апрель-май (0,236 жана 0,186) жана август-сентябрда (0,127 жана 0,150) байкалган эки максимумду белгилей кетүү керек. Минималдуу сезондук өзгөрүүлөр декабрда болгон ($AOD_{440}=0,069$). Эсептөөлөр көрсөткөндөй, чаң аэрозолунун болушу атмосферанын жогорку жана төмөнкү чектеринде фондук шарттарга салыштырмалуу муздатуу эффекттин 2-5 эсеге жогорулатат жана чаңдуу атмосферанын өзүн ысытууга алып келет.

Түйүндүү сөздөр: атмосфералык аэрозоль; оптикалык калыңдык; чаң; күн фотометри; бир чачыраган альbedo; сезондук вариация.

GROUND-BASED MONITORING OF ATMOSPHERIC AEROSOL PARAMETER VARIATIONS IN THE CENTRAL ASIA REGION

L. G. Sverdlik

Abstract. The paper presents the results of measurements of optical and microphysical characteristics of atmospheric aerosol using the CIMEL CE-318 sun photometer located at the Field Experimental Base of the High-Mountain Observatory for Physics of Atmospheric Processes KRSU and Research Station of the RAS in Bishkek (IAOCA-KRSU station, AERONET/PHOTONS). Based on a year-long observational cycle from September 2022 to August 2023, seasonal features of aerosol pollution in the region were identified and analyzed, including the identification of emission sources, the delineation of dominant particle types, and their impact on the atmospheric radiation regime. Among the notable features of seasonal variability in aerosol optical thickness at a wavelength of 440 nm (AOD_{440}), two maxima were observed in April-May (0.236 and 0.186) and August-September (0.127 and 0.150). The minimum of seasonal variations occurred in December ($AOD_{440}=0.069$). Calculations indicated that the presence of dust aerosol increased the cooling effect at the upper and lower boundaries of the atmosphere 2–5 times compared to background conditions and caused heating of the dust-laden atmosphere itself.

Keywords: atmospheric aerosol; optical depth; dust; sun photometer; single-scattering albedo; seasonal variations.

Введение. Важным компонентом атмосферы являются аэрозольные частицы природного и антропогенного происхождения, которые играют значительную роль в изменении радиационного баланса Земли [1, 2], влияют на гидрологический режим и состояние ледников, ухудшают качество воздуха, отрицательно воздействуя на здоровье людей и продуктивность сельского хозяйства [3]. При этом существуют большие неопределенности в количественной оценке влияния аэрозолей на климат, недостаточно знаний о морфологии аэрозолей, их химических характеристиках и пространственном распределении, тенденциях изменения содержания взвешенных в атмосфере частиц, особенно в регионах с интенсивными источниками аэрозолей [4]. Фактор сильного загрязнения атмосферного воздуха, угрожающего здоровью людей, является серьезной проблемой для многих регионов Азии. Способствует этому быстрый рост населения, экономической деятельности, увеличение количества автотранспорта и связанный с этим рост количества различных видов используемого топлива, а также наличие обширных территорий с высоким уровнем эмиссии минеральной пыли [5, 6]. Расположение Кыргызстана в глобальном поясе пыли, протянувшимся от пустынь Северной Африки и Ближнего Востока до северо-западного Китая и непосредственная близость от крупной пустыни Такла-Макан, определяет особую важность проведения аэрозольных наблюдений для изучения процессов загрязнения воздуха во время экологически опасных ситуаций и экстремальных явлений регионального и трансграничного переноса минеральной пыли [7].

Целью работы является анализ результатов комплексного экспериментального исследования пространственного распределения и трансформации во времени оптических и микрофизических свойств аэрозоля, основанных на данных наземного дистанционного зондирования атмосферы, и получение на их основе объективной информации о сезонных особенностях аэрозольного загрязнения и его влиянии на радиационный режим атмосферы, доминирующих типах аэрозоля в регионе и источниках их эмиссии.

Место проведения эксперимента и оборудование. Полевая Экспериментальная База ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН расположена на северо-востоке Кыргызстана в Северном Тянь-Шане (42.46383 °N; 78.52895 °E; 1930 м над уровнем моря). Здесь в период с сентября 2022 по август 2023 года выполнялись регулярные наземные измерения параметров атмосферного аэрозоля солнечным фотометром CIMEL CE 318N-EBM9, имеющим 8 интерференционных фильтров (340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 и 1640 нм). Наблюдения выполняются на станции IAOCA-KRSU в рамках программы глобальной сети AERONET/PHOTONS [8, 9] с 2014 г. по настоящее время. Зарегистрированные фотометром интенсивности прямой и рассеянной солнечной радиации обрабатывались по стандартным алгоритмам (Spectral De-convolution Algorithm, SDA; Version 3 Inversion) в NASA / GSFC (NASA Goddard Space Flight Center) [10]. В настоящей работе представлены результаты измерений в 2022–2023 гг.,

Таблица 1 – Количество измерительных дней (N days) и точек данных (N points) на станции IAOSA-KRSU в 2022–2023 гг. и число дней, идентифицированных как случаи выноса Азиатской (A_Dust) и Ближневосточной (M-E_Dust) пыли (Dusty days) и дыма (Smoky days)

Year	2022				2023								Total
Month	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	
N days	25	20	19	18	25	13	26	22	22	23	26	24	263
N points	708	402	165	269	369	219	740	564	510	597	446	623	5612
Dusty days	8	5	2	0	2	2	10	10	9	6	3	6	63
Smoky days	2	0	0	0	0	0	0	0	4	4	1	1	12

полученные с применением процедуры фильтрации облаков (Уровень 1.5), которая основана на анализе короткопериодных вариаций аэрозольной оптической толщины (AOD).

Дополнительная информация, включающая определение масштабов распространения загрязнений атмосферы в регионе, идентификацию типа аэрозольных частиц и источников их эмиссии, получена с использованием глобальных моделей HYSPLIT [11] и NAAPS [12].

Данные наземных фотометрических измерений AERONET. Общее количество дней проведения измерений фотометром CIMEL составило 263, число точек данных – 5612. Распределение этих статистических показателей по месяцам приведено в таблице 1. Наибольшее количество измерений приходилось на весенний период. Заметное сокращение объема данных в ноябре 2022 г. и феврале 2023 г. связано с периодическими сбоями в работе прибора и неблагоприятными погодными условиями.

Из обширного набора фотометрических данных были проанализированы аэрозольная оптическая толщина на длине волны 440 нм (AOD_{440}), показатель Ангстрема ($AE_{440-870}$), рассчитанный для длин волн 440 и 870 нм, альbedo однократного рассеяния (SSA) и его зависимость от длины волны ($\Delta SSA/d\lambda$), деполаризационное отношение DR на длине волны 1020 нм.

Гистограммы повторяемости средних за каждый день значений AOD_{440} и $AE_{440-870}$ и построенные на их основе интегральные распределения (рисунок 1) показали, что половина точек данных AERONET приходилась на диапазоны значений 0.08–0.16 и 1.1–1.9, а медианы распределений составили 0.127 и 1.44, соответственно. Среднегодовые значения параметров составляли 0.122 ± 0.053 и 1.46 ± 0.69 . При том, что AOD_{440} характеризовалась широким диапазоном изменчивости (от 0.018 до 1.092), преобладали относительно небольшие значения $0.06 \leq AOD_{440} \leq 0.250$, составляющие 90 % всех измерений. В течение исследуемого периода 28 среднесуточных значений AOD_{440} (~10 % данных) превышали пороговый уровень 0.250 и могут использоваться для исследования эпизодов с наиболее высоким содержанием аэрозолей. Частотное распределение $AE_{440-870}$ имело более сложную, многомодовую форму с группированием аэрозольных событий в области модальных значений 0.4–0.5, 0.8–0.9, 1.1–1.2, 1.7–1.8, что предполагало возможное соответствие каждой из групп определенному типу аэрозоля, имеющему соответствующие оптические и микрофизические свойства.

Сезонные изменения параметров аэрозоля. Анализ данных, полученных солнечным фотометром, позволил установить особенности сезонных вариаций основных параметров атмосферного аэрозоля в столбе атмосферы. Характерными чертами годовой изменчивости аэрозольной оптической толщины является наличие двух максимумов: в конце лета – начале осени (август–сентябрь) и весной (март–май), что, вероятно, связано, главным образом, с интенсивностью вторжений минеральной пыли. На это указывает хорошее совпадение представленного на рисунке 2, а годового хода среднемесячных значений AOD_{440} с изменчивостью количества пылевых дней (N_Dusty Days). Кроме того, оба пика AOD_{440} совпадали с максимумами деполаризационного отношения DR и оптической толщины аэрозольного поглощения ($AAOD_{440} \geq 0.008$), а также низкими величинами показателя Ангстрема ($AE_{440-870} \leq 1.0$) (рисунок 2, б), типичными для крупнодисперсных несферических частиц минеральной пыли [13].

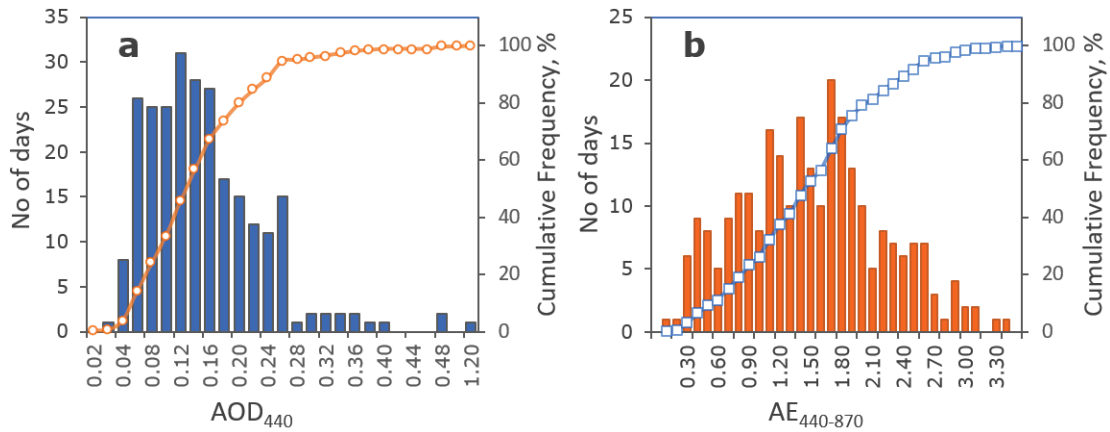


Рисунок 1 – Интегральные распределения повторяемости и гистограммы измеренных значений AOD₄₄₀ (a) и AE₄₄₀₋₈₇₀ (b)

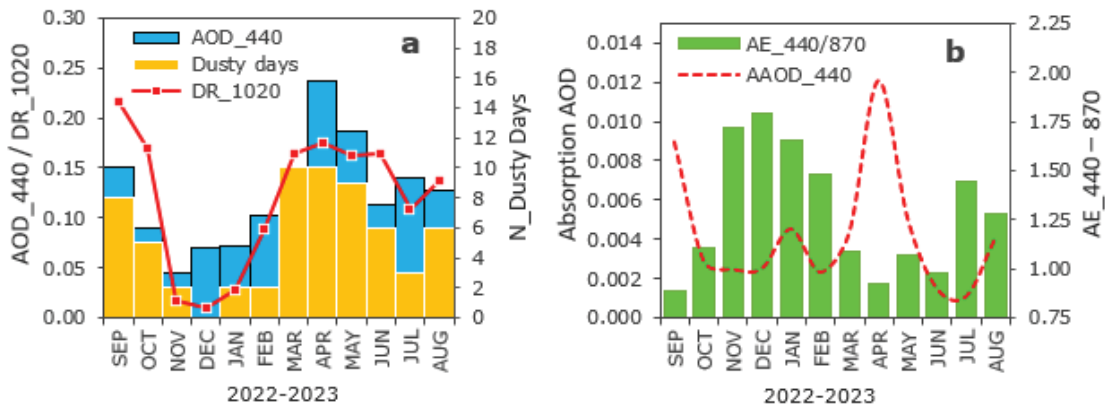


Рисунок 2 – Изменчивость среднемесячных значений AOD₄₄₀, деполяризационного отношения DR₁₀₂₀ и количества пылевых дней (N_Dusty Days) (a), а также AOD поглощения и показателя Ангстрема AE₄₄₀₋₈₇₀ (b) в 2022–2023 гг.

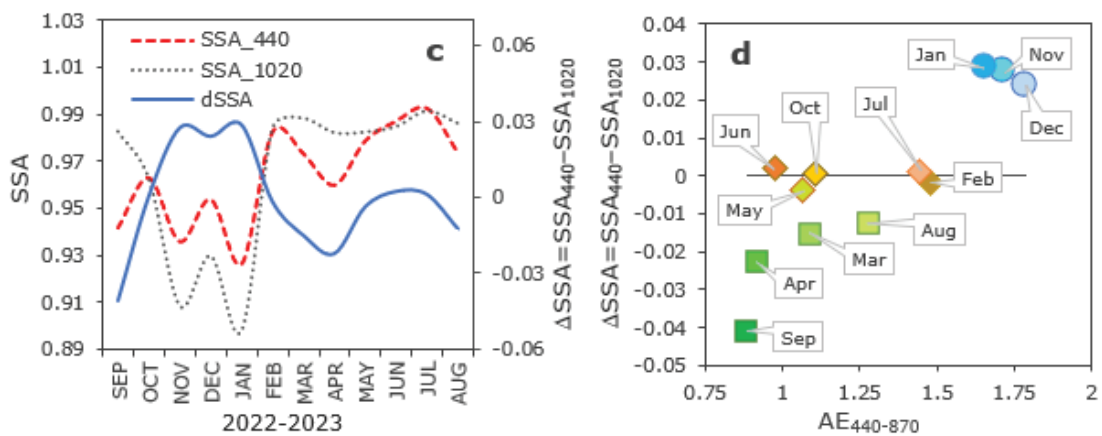


Рисунок 3 – Вариации среднемесячных значений SSA₄₄₀, SSA₁₀₂₀ и ΔSSA (a) и зависимости ΔSSA от показателя Ангстрема AE₄₄₀₋₈₇₀ (b)

Наглядной иллюстрацией сезонной изменчивости оптических и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля является зависимость между преобладающими размерами и поглощающими свойствами частиц [14], представленными спектральной изменчивостью оптической толщины ($AE_{440-870}$) и альбедо однократного рассеяния ($\Delta SSA = SSA_{440} - SSA_{1020}$) (рисунок 3, а). Годовой цикл ΔSSA показал тенденцию изменения от более сильного поглощения в коротковолновой области спектра ($\Delta SSA < 0$), до преобладающего поглощения на длине волны 1020 нм ($\Delta SSA > 0$) (рисунок 3, б). Это связано с особенностями спектров поглощения крупнодисперсной пыли и частиц, образованных в процессе тлеющего или открытого горения, которые содержат сильно поглощающие компоненты: оксиды железа (гематит Fe_2O_3 , гетит $FeOOH$) и черный углерод (BC), соответственно [15].

Отрицательные значения ΔSSA наблюдались преимущественно в весенний период и августе–сентябре (данные отмечены зелеными квадратами), когда под влиянием событий Азиатской и Ближневосточной пыли в атмосфере доминировали крупные частицы минеральной пыли ($AE_{440-870} \leq 1.0$). Отдельные эпизоды вторжения пыли регистрировались и в течение других месяцев, например, в июне и октябре ($\Delta SSA \approx 0$, $AE_{440-870} \approx 1.0$). Значения параметра Ангстрема в диапазоне от 1.0 до 1.5 и $\Delta SSA \approx 0$ характеризовали типичный для летних месяцев смешанный тип аэрозоля, состоящий из тонкодисперсного загрязнения и частиц минеральной пыли. При уменьшении вклада крупных частиц пыли ($1.6 < AE_{440-870} \leq 1.9$), более существенным становится поглощение на длине волны 1020 нм, что может оцениваться, как увеличение роли BC [16]. Это было характерно для периода наблюдений с ноября 2022 г. по январь 2023 г.

Классификация основных типов атмосферного аэрозоля. Как было установлено, одной из отличительных черт является большой диапазон сезонных изменений параметров аэрозоля, что может являться не только признаком присутствия аэрозоля, различающегося содержанием тонкодисперсных и крупных частиц, но и определяется особенностями состава частиц и преобладающими в них компонентами. Для получения более детальной информации об особенностях изменения аэрозольной нагрузки атмосферы были проанализированы среднесуточные значения параметров, характеризующих содержание, поглощающие свойства и размер частиц. Данные наблюдений среднесуточных значений AOD_{440} и $AE_{440-870}$ и изменения дисперсного состава атмосферного аэрозоля ($AE_{440-870}$) в зависимости от AOD_{440} показаны на рисунке 4. Как видно, вклад отдельных типов аэрозоля изменялся в зависимости от сезона. Наиболее высокие уровни аэрозольной нагрузки атмосферы ($AOD_{440} \geq 0.3$) являлись следствием выносов крупных частиц минеральной пыли, преобладающих весной и осенью ($AE_{440-870} \leq 0.5$). Эпизоды, характеризующиеся высоким уровнем тонкодисперсного антропогенного загрязнения ($AE_{440-870} > 1.2$) и/или продуктов сжигания биомассы ($AE_{440-870} > 1.5$), наблюдались зимой и летом, соответственно.

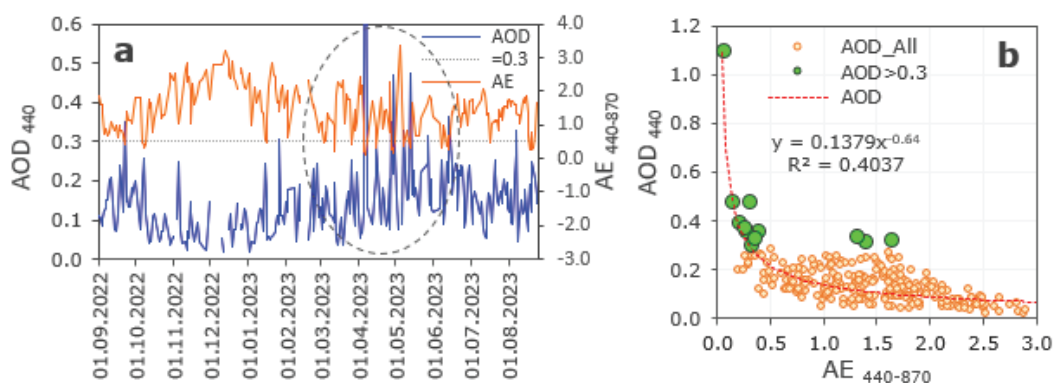


Рисунок 4 – Изменчивость среднесуточных значений AOD_{440} и $AE_{440-870}$ на станции IAOCA-KRSU (а) и соответствующая зависимость AOD_{440} от $AE_{440-870}$ (б)

Дни, когда доминировали крупнодисперсные частицы Азиатской пыли, определялись по значениям показателя Ангстрема $AE_{440-870} \leq 0.7$ при условии $AOD_{440} > 0.15$ и отрицательных значениях ΔSSA . Дальний перенос пыли с ближневосточного направления сопровождался существенным уменьшением вклада частиц крупной фракции ($0.3 < AE_{440-870} < 1.1$). Для мелкодисперсных частиц аэрозольного загрязнения ($AE_{440-870} \geq 1.5$), образованного в результате сгорания биомассы и интенсивных лесных пожаров в России и Казахстане, использовались данные солнечного фотометра со значениями оптической толщины $AOD_{440} > 0.1$ и положительными ΔSSA . Группу смешанного типа аэрозоля, в соответствии с диапазоном изменения альbedo однократного рассеяния, составили слабо поглощающие частицы ($SSA_{440} > 0.98$; $\Delta SSA \approx 0$) с характерными пределами изменения показателя Ангстрема $0.9 < AE_{440-870} < 1.5$. Фоновый или чистый континентальный аэрозоль, состоящий преимущественно из тонкодисперсных частиц сульфатов (SO_4) и органических веществ ($AE_{440-870} > 1.7$) с малым содержанием абсорбирующих компонентов [2, 14], имел самое низкое поглощение ($\Delta SSA \approx 0$) по сравнению с другими типами аэрозоля и почти нейтральное поведение спектра SSA. В соответствии с этими критериями и с учетом результатов моделирования обратных траекторий (HYSPLIT), и сопоставления с данными аэрозольной модели NAAPS была произведена идентификация доминирующих в атмосфере типов аэрозоля.

В результате были выделены пять основных типов аэрозоля: фоновый континентальный или сульфатный (*Background*); Азиатская (*Asian Dust*) и Ближневосточная (*M-East Dust*) пыль; дым, образованный в результате сгорания биомассы (*Smoke*); смешанный слабо поглощающий аэрозоль (*Mixed*). Представленные различными маркерами для каждого типа аэрозоля зависимости оптической толщины AOD_{440} и спектральной изменчивости альbedo однократного рассеяния ($\Delta SSA = SSA_{440} - SSA_{1020}$) от показателя Ангстрема $AE_{440-870}$, показаны на рисунке 5.

Средние значения оптических параметров, характеризующих различные типы частиц атмосферного аэрозоля, приведены в таблице 2.

Аэрозольные радиационные эффекты. Для количественной оценки прямого воздействия аэрозоля на радиационный баланс атмосферы широко используется величина, называемая аэрозольным радиационным форсингом (ΔF), который определяется как разность эффективных радиационных потоков с учетом и без учета аэрозоля [17, 18]. Степень влияния аэрозоля на радиационный режим атмосферы определяется многими параметрами, включая AOD и SSA . На рисунке 6 приведены среднемесячные и средние за день оценки радиационного форсинга на верхней (ΔF_{TOA}) и нижней (ΔF_{BOA}) границах атмосферы и во всей толще атмосферы (ΔF_{ATM}) по данным измерений в 2022–2023 гг. и в марте–мае 2023 г.

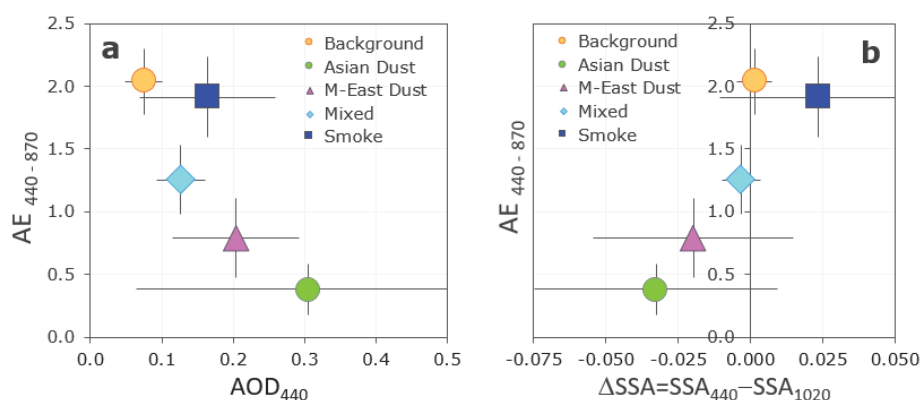


Рисунок 5 – Сопоставление оптической толщины AOD_{440} (a) и различия между альbedo однократного рассеяния SSA_{440} и SSA_{1020} (ΔSSA) (b) от параметра Ангстрема $AE_{440-870}$ для периода измерений с марта по май 2023 г.

Таблица 2 – Средние (\pm СКО) значения основных оптических параметров для выделенных типов атмосферного аэрозоля

Parameter	Aerosol Type				
	Background	Asian Dust	M-East Dust	Smoke	Mixed
AOD ₄₄₀	0.075 \pm 0.027	0.305 \pm 0.240	0.204 \pm 0.089	0.164 \pm 0.095	0.126 \pm 0.034
AE ₄₄₀₋₈₇₀	2.04 \pm 0.26	0.38 \pm 0.20	0.79 \pm 0.32	1.91 \pm 0.32	1.25 \pm 0.28
SSA ₄₄₀	0.992 \pm 0.003	0.953 \pm 0.038	0.972 \pm 0.035	0.971 \pm 0.038	0.988 \pm 0.008
Δ SSA ₄₄₀₋₁₀₂₀	0.0014 \pm 0.0060	-0.033 \pm 0.041	-0.020 \pm 0.032	0.024 \pm 0.0338	-0.0033 \pm 0.007
DR ₁₀₂₀	0.07 \pm 0.04	0.25 \pm 0.05	0.19 \pm 0.04	0.04 \pm 0.04	0.11 \pm 0.05

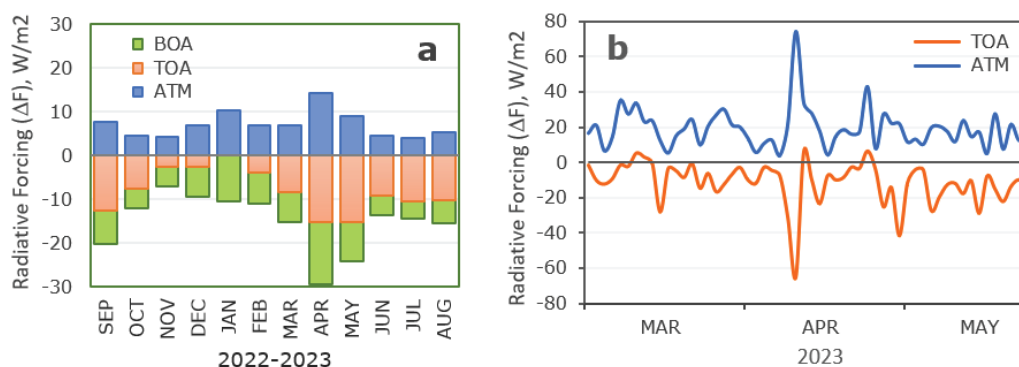


Рисунок 6 – Вариации среднемесячных значений на нижней (ΔF_{BOA}) и верхней (ΔF_{TOA}) границе атмосферы и в самой атмосфере (ΔF_{ATM}) в 2022–2023 гг. (a) и среднесуточные значения ΔF на TOA и в ATM весной 2023 г. (b)

Результаты фотометрических измерений свидетельствуют, что радиационный форсинг на нижней границе атмосферы в фоновых условиях изменялся от -5 до -15 Вт/м², в условиях выносов пыли увеличивался до -50 Вт/м², а в экстремальных пылевых событиях достигал -150 Вт/м² и более. Одновременно поглощение запыленной атмосферой коротковолновой солнечной радиации [14] обусловило увеличение ΔF_{ATM} от $5-20$ Вт/м² до $40-70$ Вт/м² и, соответственно, возрастание скорости нагрева атмосферы ($\delta T/\delta t$), которую можно оценить величиной $\sim 2.0-4.1$ К/день.

Заключение. С сентября 2022 г. на Полевой Экспериментальной Базе ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН (станция IAOSA-KRSU) были возобновлены регулярные измерения параметров атмосферы с помощью солнечного фотометра CIMEL CE-318, которые выполняются по программе международной сети AERONET/PHOTONS. Представленные сезонные особенности изменчивости параметров атмосферного аэрозоля отражают подверженность региона воздействию различных источников аэрозольного загрязнения. Сильное влияние Азиатской и Ближневосточной пыли наблюдалось преимущественно в весенние месяцы, а частиц аэрозоля, образованных в результате сгорания биомассы, в летний период.

Результаты продемонстрировали возможность идентификации типа аэрозоля на основе информации о спектральной зависимости альbedo однократного рассеяния (Δ SSA) и преобладающих размерах частиц ($AE_{440-870}$).

Анализ полученных результатов показывает, что загрязнение атмосферы пылевым аэрозолем приводит к дополнительному нагреванию атмосферы. При этом наличие пылевого аэрозоля в 2–5 раз по сравнению с фоновыми условиями увеличивает выхолаживающее воздействие на границах атмосферы.

Радиационный форсинг на нижней границе атмосферы в условиях выносов пыли увеличивается до $-50 \dots -150$ Вт/м² и более.

Следующим этапом исследований будет сравнительный анализ результатов наземных наблюдений оптических характеристик атмосферного аэрозоля с данными спутниковых измерений (MODIS и VIIRS) во время событий аномального загрязнения атмосферы над исследуемым регионом.

Проведенные исследования выполнены в рамках государственного задания ФГБУН Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке по теме: «Изучение геофизических полей и процессов как основы прогноза землетрясений на базе мониторинга и моделирования неупругих процессов в сейсмогенерирующих средах». Регистрационный номер темы: 1021052806454-2-1.5.1. Работа также выполнялась сотрудниками ВГО ФАП КРСУ и ИС РАН в рамках проекта по Программе Развития КРСУ.

Поступила: 26.02.24; рецензирована: 12.03.24; принята: 14.03.24.

Литература

1. Свердлик Л.Г. Аэрозольное воздействие на перенос радиации и дистанционное лазерное зондирование оптических и физических характеристик атмосферного аэрозоля / Л.Г. Свердлик // Вестник КРСУ. 2005. Т. 5. № 7. С. 105–108.
2. Свердлик Л.Г. Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2014. № 4. С. 26–31.
3. Eom S. Long-term variation of aerosol optical properties associated with aerosol types over East Asia using AERONET and satellite (VIIRS, OMI) data (2012–2019) / S. Eom, J. Kim, S. Lee, B.N. Holben, T.F. Eck, S.-B. Park, S.S. Park // Atmospheric Research. 2022. Vol. 280. Article ID 106457. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106457.
4. Свердлик Л.Г. Изменчивость параметров атмосферы по данным наземных и спутниковых измерений / Л.Г. Свердлик // Вестник КРСУ. 2023. Т. 23. № 8. С. 165–171. DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-8-165-171.
5. Rupakheti D. Characterization of columnar aerosol over a background site in Central Asia / D. Rupakheti, M. Rupakheti, M. Rai, X. Yu, X. Yin, S.F. Kang, M.D. Orozaliyev, V.P. Sinyakov, S.F. Abdullaev, I.D. Sulaymon, J. Hu // Environmental Pollution. 2023. Vol. 316. ID 120501. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120501.
6. Tindan J.Z. Understanding day–night differences in dust aerosols over the dust belt of North Africa, the Middle East, and Asia / J.Z. Tindan, Q. Jin, B. Pu // Atmos. Chem. Phys. 2023. Vol. 23. Pp. 5435–5466.
7. Habib A. Dust particles in the free troposphere over a Chinese desert region as revealed from balloon-borne measurements under calm weather conditions / A. Habib, B. Chen, G.-Y. Shi, Y. Iwasaka, D. Nath, B. Khalid, S.-C. Tan, T. Mahmood, R.-G. Jiao, N. Dider // Atmospheric and Oceanic Science Letters. 2019. Vol. 12. No. 1. P. 12–20. DOI: 10.1080/16742834.2019.1536645.
8. The AERONET (AErosol RObotic NETwork). URL: <http://roc.gsfc.nasa.gov/aeronet/> (дата обращения: 15 февраля 2024 г.).
9. Свердлик Л.Г. Результаты сравнения экспериментальных (AERONET) и модельных (NAAPS) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над Северным Тянь-Шанем / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации. 2016. № 3. С. 3–9.
10. Eck T.F. Observations of the interaction and transport of fine mode aerosols with cloud and/or fog in Northeast Asia from Aerosol Robotic Network and satellite remote sensing / T.F. Eck, B.N. Holben, J.S. Reid, P. Xian, D.M. Giles, A. Sinyuk, et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2018. Vol. 123. Pp. 5560–5587. DOI: 10.1029/2018JD028313.
11. Stein A.F. NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System / A.F. Stein, R.R. Draxler, G.D. Rolph, J.B. Stunder, M.D. Cohen, F. Ngan // Bulletin of the American Meteorological Society. 2015. Vol. 96. No. 12. Pp. 2059–2077. DOI: 10.1175/bams-d-14-00110.1.
12. The Navy Aerosol Analysis and Prediction System (NAAPS). URL: http://www.nrlmry.navy.mil/aerosol/index_shortcuts.html (дата обращения: 17 февраля 2024 г.).
13. Sicard M. Aerosol optical, microphysical and radiative properties at regional background insular sites in the western Mediterranean / M. Sicard, R. Barragan, F. Dulac, L. Alados-Arboledas, M. Mallet // Atmos. Chem. Phys. 2016. Vol. 16. P. 12177–12203. DOI: 10.5194/acp-16-12177-2016.
14. Свердлик Л.Г. Идентификация основных типов аэрозоля по данным фотометрических измерений (AERONET) / Л.Г. Свердлик // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2013. № 3. С. 3–7.

15. *Derimian Y.* The role of iron and black carbon in aerosol light absorption / Y. Derimian, A. Karnieli, Y.J. Kaufman, M.O. Andreae, T.W. Andreae, O. Dubovik, W. Maenhaut, I. Koren // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. Vol. 8. Pp. 3623–3637.
16. *Bergstrom R.W.* Spectral absorption properties of atmospheric aerosols / R.W. Bergstrom, P. Pilewskie, P.B. Russell, J. Redemann, T.C. Bond, P.K. Quinn, B. Sierau // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. Vol. 7. Pp. 5937–5943.
17. *Lin J.* Analysis of Aerosol Type and Fine- and Coarse-mode Aerosol Direct Radiative Forcing over Regions in East and Southeast Asia Based on AERONET Version 3 Data / J. Lin, X. Shen, L. Xing, H. Che, B.N. Holben // *Aerosol and Air Quality Research.* 2021. Vol. 21. Issue 7. ID. 200503. DOI: 10.4209/aaqr.200503.
18. *Адушкин В.В.* Радиационный форсинг аэрозолей Центральной Азии / В.В. Адушкин, Б.Б. Чен, С.И. Попель, П.Г. Вайдлер, С.А. Имашев, Т.В. Лосева, Л.Г. Свердлик, Ф. Фридрих // *Доклады Академии наук.* 2015. Т. 460. № 4. С. 459–463. DOI: 10.7868/S0869565215040209.