

Пространственно-временные характеристики АОТ атмосферы в пустыне Гоби по данным наземных наблюдений

А.С. Заяханов¹, Г.С. Жамсуева¹, С.А. Нагуслаев¹, В.В. Цыдыпов¹,
А.А. Аюржанаев¹, С.М. Сакерин², Д.М. Кабанов²,
Д. Азжая³, Д. Оюнчимег^{3*}

¹Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8, Россия

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

³Институт метеорологии и гидрологии Монголии
210646, г. Улан-Батор, Жулчны гудамж, 5, Монголия

Поступила в редакцию 27.09.2011 г.

Обсуждаются результаты исследования аэрозольной оптической толщи (АОТ) в атмосфере аридной зоны Монголии. Пункты фотометрических наблюдений располагались на территории пустыни Гоби – станции Даланзадгад, Сайншанд, Баруун-Урт. Для анализа сезонных и межгодовых вариаций АОТ использованы данные многолетних наблюдений на станции AERONET в Даланзадгаде за период с 1997 по 2010 г. Установлено, что в пустыне Гоби наблюдается в среднем высокая прозрачность атмосферы (среднее АОТ в области 500 нм составляет 0,09) с ярко выраженным годовым ходом с максимумом в весенние и летние месяцы и из-за высокой повторяемости пыльных бурь в этот период и минимумом в зимние месяцы. В летние месяцы высокая доля мелкодисперсного аэрозоля по сравнению с другими сезонами. Анализируются спектральные особенности АОТ атмосферы в условиях пылевых выносов и пространственные различия в разных климатических зонах: в условиях сухого климата аридной зоны Монголии и умеренной климатической зоны Байкальского региона.

Ключевые слова: солнечная фотометрия, аэрозольная оптическая толщина, пустыня Гоби, пыль; solar photometry, aerosol optical depth, Gobi desert, dust.

Введение

Аэрозоль почвенно-эрозийного происхождения является важнейшим компонентом атмосферы и составляет по различным оценкам от 50 до 80% полного (по массе) количества аэрозоля. Одним из мощных глобальных источников поступления пылевого аэрозоля в атмосферу являются пустыни, занимающие около 30% территории суши.

Важнейшая особенность пылевого аэрозоля состоит в том, что он подвергается дальнему переносу на очень большие расстояния. Именно поэтому в периоды пыльных бурь в пустынях пылевой аэрозоль является существенным компонентом тропосферного аэрозоля. Наиболее мощными источниками пылевого аэрозоля (ПА) являются Сахара, пустыни Средней Азии и Восточной Азии.

Первые комплексные наблюдательные эксперименты с целью аэрозольно-радиационных исследований пылевого аэрозоля пустынь были начаты в рамках программы комплексных энергетических экспериментов КЭНЭКС – (1970–1973) [1–4], Глобальный аэрозольно-радиационный эксперимент ГАРЭКС (пустыня Каракумы, 1977, 1979 гг.) [5], советско-американский пылевой эксперимент САПЭКС (Таджикистан, 1989 г.) [6] и получили дальнейшее развитие в рамках комплексных пылевых экспериментов SHADE (пустыня Сахара) [7–10], ACE-Asia (пустыни Северо-Западного Китая) [11–17, 19]. Главная цель экспериментов состояла в получении как можно более полной информации о физических характеристиках пыли, изучении динамики пылевого аэрозоля в периоды возникновения пылевых бурь и путей дальнего переноса ПА в другие регионы.

Для корректного учета влияния пылевого аэрозоля на формирование климата необходимы исследования закономерностей изменчивости аэрозоля в аридных районах и прилегающих регионах. С развитием глобальной сети AERONET начались регулярные измерения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля, в том числе на станциях,

* Александр Савельевич Заяханов (lrf@pres.bscnet.ru); Галина Санжиевна Жамсуева (lrf@pres.bscnet.ru); Сергей Анатольевич Нагуслаев; Вадим Владимирович Цыдыпов; Александр Андреевич Аюржанаев; Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Долгорсурен Азжая; Дучержав Оюнчимег.

расположенных в аридных зонах африканских и азиатских пустынь. Однако такого количества станций для этих огромных территорий с их метеорологическими и климатическими особенностями недостаточно, особенно это относится к пустыням Такла-Макан и Гоби, которые являются основными источниками пылевого аэрозоля в Азиатско-Тихоокеанском регионе [18]. На территории Такламакан и Гоби действует единственная станция AERONET – ст. Даланзадгад. Результаты измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы в этом районе с 1997 до 2005 г. обсуждались в работах [20, 21].

В последние годы получили развитие региональные сети мониторинга пылевого аэрозоля при поддержке программ KOSA Monitor (JICA) (<http://www.nies.go.jp>) в Монголии, China DSR в Китае [11], Asian Dust Network (AD-Net) [22]. Результатом координированной работы стало формирование пополняющихся баз данных, содержащих информацию о динамике параметров пылевого аэрозоля. Заметим, однако, что не все станции аэрозольных исследований находятся непосредственно в аридных районах. Например, в Монголии ведутся фотометрические наблюдения на ст. Mandalgovi (сеть SKYNET) [23], расположенной севернее пустыни Гоби, поэтому характеристики АОТ в этом районе могут иметь некоторые количественные или качественные отличия.

Важным дополнением к сетевым наблюдениям являются экспедиционные исследования оптических характеристик аэрозоля в аридных районах. В настоящей статье, дополнительно к многолетним данным на станции AERONET в Даланзадгаде, представлены результаты измерений АОТ атмосферы в нескольких летних экспедициях 2006–2010 гг. на ст. Сайншанд и Баруун-Урт.

Характеристика измерений и региона исследований

Измерения АОТ атмосферы проводились на территории Восточной Гоби (Монголия) примерно на од-

ной широте: ст. Сайншанд (44°53' с.ш., 110°08' в.д.; 932 м) и на ст. Даланзадгад (43°34' с.ш., 104°25' в.д.; 1430 м) в аридной зоне, а также на ст. Баруун-Урт (46°40' с.ш., 113°16' в.д.) в полуаридной степной зоне, с более высокой плотностью растительного покрова. Схема расположения станций показана на рис. 1.

На ст. Сайншанд и Баруун-Урт использовался автоматизированный солнечный фотометр SP-7 [24], на ст. Даланзадгад – фотометр CE-318 (AERONET; <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). Наблюдения проводились в непрерывном режиме в условиях безоблачной атмосферы. Сопоставимость рядов наблюдений разными фотометрами, несмотря на различие в методиках измерений и расчета оптических характеристик, достаточно высокая и не превышает погрешности измерений каждого из фотометров. Более подробно характеристики фотометров, методик калибровки и определения АОТ и влагосодержания рассмотрены в работах [24, 25].

Для исключения искажающего влияния облачности, данные AERONET наблюдений по уровню Level 2 прошли дополнительную селекцию на основе использования спутниковой информации о состоянии облачности (<http://www.icc.mn/>). Контроль и отбор данных измерений 2006–2010 гг. проводились с учетом метеоусловий непосредственно во время экспериментов, таких как наличие полупрозрачной облачности, дымки и т.п.

Из полученных результатов рассчитывались среднечасовые и среднедневные значения АОТ и влагосодержания атмосферы. Параметр Ангстрема α определялся методом наименьших квадратов для среднечасовых и среднедневных значений τ_{λ}^a в диапазоне спектра 340–1020 нм. Сроки наблюдений и объем экспериментальных данных представлены в таблице.

Фотометрические наблюдения сопровождалось непрерывными измерениями метеорологических параметров с помощью акустического метеорологического комплекса АМК: скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, давление, турбулентные характеристики.



Рис. 1. Схема расположения фотометрических станций
Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Нагуслаев С.А. и др.

Сроки наблюдений и объем полученных данных

Год	Место измерений	Период измерений	Количество дней измерений	Количество замеров
1997	Даланзадгад	05.03–03.09	118	2912
1998	Даланзадгад	15.03–09.12	168	5203
1999	Даланзадгад	11.01–30.12	253	7042
2000	Даланзадгад	04.01–30.12	299	10807
2001	Даланзадгад	02.01–01.08; 11.10–31.12	265	5863
2002	Даланзадгад	01.01–30.12	301	8917
2003	Даланзадгад	02.01–30.12	312	8944
2004	Даланзадгад	01.01–10.03; 04.05–31.12	358	8792
2005	Даланзадгад	01.01–12.01; 09.04–24.08; 17.11–31.12	194	6727
2006	Даланзадгад	01.01–17.02; 03.04–30.11	277	10437
	Улан-Батор	29.06; 18.07	2	338
	Сайншанд	30.06–08.07	7	4148
	Баруун-Ург	23.07–30.07	6	1478
2007	Даланзадгад	01.01–17.10	242	9055
	Сайншанд	11.07–22.07	10	5205
	Баруун-Ург	23.07–30.07	4	877
2008	Сайншанд	22.07–30.07	9	3586
2009	Даланзадгад	26.08–31.12	102	1785
	Сайншанд	10.08–19.08	11	6983
2010	Даланзадгад	01.01–05.05	84	3125
	Сайншанд	09.08–22.08	15	9216

Приведем краткую климатогеографическую характеристику района наблюдения. Пустыня Восточная Гоби представляет собой равнину, лежащую на высоте 1000 м над ур.м., и является местом с ярко выраженным резко континентальным климатом на планете. Максимальные значения температуры воздуха летом достигают значений от 45 до 58 °С с разницей между дневными и ночными температурами до 20 °С. Минимальные температуры наблюдаются в январе до минус 35 °С [26].

Пустыня Гоби практически со всех сторон окружена высокими горными хребтами, что мешает проникновению на ее территорию влажного воздуха Атлантики и Тихого океана. Это и обеспечивает сухость воздуха и высокую прозрачность. Горные хребты оказывают большое влияние на эволюцию барических образований и на перемещение атмосферных фронтов.

В зимний период территория Монголии занята обширным азиатским антициклоном, центр которого нередко находится над центральными районами Монголии. Продолжительный антициклонический режим холодной погоды способствует проникновению вечной мерзлоты далеко на юг Монголии, а также играет немаловажную роль в пустынном характере ландшафтов Центральной и Южной Монголии.

В начале весны антициклон над Монголией постепенно ослабевает и разрушается. Теплые воздушные массы, формирующиеся над Западным Китаем, начинают проникать в Монголию. С апреля уже

большое влияние на погоду Монголии оказывает азиатский фронт умеренных широт, активность которого к концу весны возрастает. Фронт постепенно перемещается от южных к северным районам Монголии. Между холодными массами Восточной Сибири и прогретыми массами, поступающими на территорию Монголии из Китая, создаются значительные градиенты температуры. Большой контраст температур и горный рельеф Монголии благоприятствуют развитию волн или углублению частных циклонов на азиатском фронте. Между углубляющимися циклонами и достаточно мощным антициклоном над Восточной Сибирью на территории Монголии создаются большие барические градиенты, возникают сильные шквалистые ветры, нередко сопровождающиеся интенсивными пыльными бурями.

В летний период месячные значения амплитуды температур уменьшаются, интенсивность и продолжительность пыльных бурь ослабевают. Характерной особенностью летней циркуляции является усиление циклонической деятельности. Значительную активность проявляет азиатский фронт, который отделяет китайский континентальный тропический воздух от сибирского континентального воздуха.

В начале осени азиатский фронт по мере усиления выхолаживания и формирования области высокого давления отступает к югу и юго-востоку, уходя за пределы Монголии. Происходит постепенное формирование антициклона вследствие прохождения через территорию Монголии отдельных ядер высокого давления и ночного выхолаживания, а также и путем поступления холодных арктических масс воздуха с севера.

Высокое расположение Монголии, значительная удаленность от океанов и морей, сложность орографических условий являются основными физико-географическими факторами, определяющими особенности циркуляции атмосферы и состав атмосферных примесей в регионе.

Результаты наблюдений и обсуждение

Межгодовая и сезонная изменчивость АОТ

Для анализа изменчивости АОТ атмосферы в пустыне Гоби использованы данные многолетних наблюдений на ст. Даланзадгад за период с 1997 по 2010 г. Следует отметить, что представленная выборка является достаточно репрезентативной для выяснения закономерностей межгодовых, сезонных и суточных вариаций АОТ.

На рис. 2 иллюстрируется многолетняя изменчивость средних сезонных и годовых значений АОТ на длине волны $\lambda = 500$ нм.

В последние годы (2007 и 2010) зарегистрировано увеличение среднегодовых значений τ_{500}^a , но в целом статистически значимого тренда не выявлено (рис. 2, а) – межгодовые вариации АОТ не превышают 0,02. Колебания сезонных значений АОТ

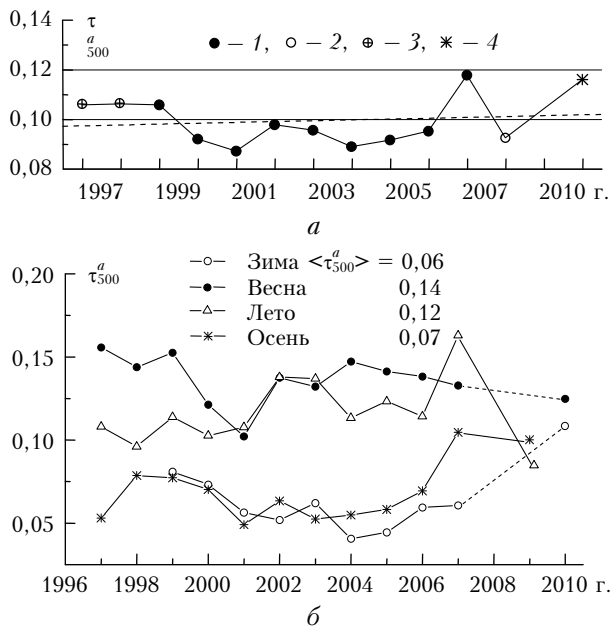


Рис. 2. Межгодовые вариации средних годовых (а) и сезонных (б) значений АОТ атмосферы на ст. Даланзадгад (1997–2010 гг.): 1 – непрерывные измерения в течение года; 2 – отсутствуют данные за зимние месяцы; 3 – отсутствуют данные за зимне-весенний период; 4 – отсутствуют данные за осенне-летний период

заметно больше, особенно весной и летом (до 0,07), когда происходят пыльные бури (рис. 2, б). Средний уровень АОТ в весенне-летний период составляет 0,12–0,14, а зимой и осенью в 2 раза ниже – 0,06–0,07.

Более детально сезонная изменчивость спектральных АОТ показана на рис. 3.

Из приведенных данных следует, что самые большие значения АОТ во всем спектральном диапазоне наблюдаются в мае, минимальные – в холодный период с ноября по январь. Селективность спектрального хода АОТ самая низкая в марте (показатель Ангстрема $\alpha = 0,62$) и высокая в июле – сентябре ($\alpha = 1,05$), что свидетельствует о большем содержании мелкодисперсного аэрозоля в этот период. Однако в среднем показатель селективности Ангстрема в аридном районе имеет меньшие значения в сравнении с континентальными районами умеренных широт. Например, по данным сибирских станций AERONET [29], среднемесячные значения α в летний период составляют 1,3–1,6, а во время зимнего минимума не опускаются ниже 0,9.

Сопоставление со средними характеристиками АОТ на ст. Даланзадгад для более раннего периода (1997–2005 гг. [20, 21]) показало качественное сходство годового хода τ_{500}^a и показателя α при количественном отличии: в весенние и летние месяцы средние τ_{500}^a выше наших данных на 0,03–0,05, а параметр Ангстрема в 1,1–1,7 раза. Различие с данными [20, 21] обусловлено несколькими причинами. Во-первых, анализ данных, представленных на сайте AERONET, показал, что средний показатель Ангстрема за общий период наблюдений снизился с 1,27 в 1997–2005 гг. до 0,79 в 2006–2010 гг. Во-вторых, в нашей работе исходные данные (Level 2) подвергались дополнительной очистке – отбраковке ситуаций с полупрозрачной облачностью, и показатель Ангстрема рассчитывался для более широкого диапазона спектра

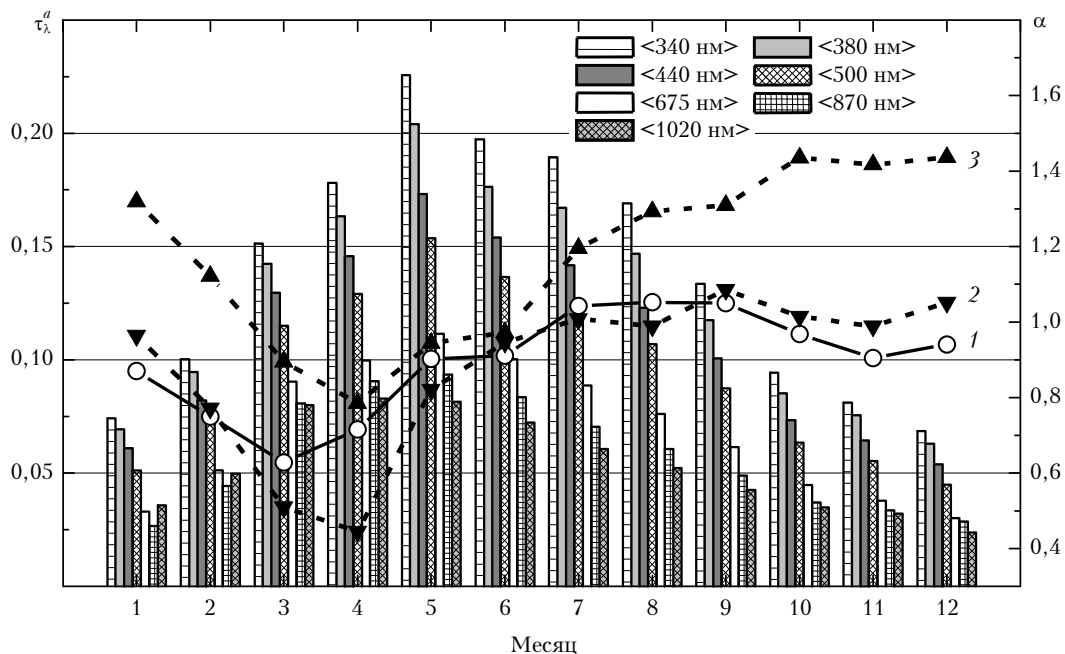


Рис. 3. Гистограмма распределения среднемесячных значений τ_{500}^a и годовой ход показателя α на ст. Даланзадгад (1997–2010 гг.): 1 – расчет α для диапазона 340–1020 нм после дополнительной очистки данных от влияния полупрозрачной облачности; 2 – расчет α для диапазона 440–870 нм по методу а); 3 – расчет α для диапазона 440–870 нм по методу б)

(340–1020 нм), что приводит к некоторому снижению α . Третье отличие связано с разными подходами усреднения данных и расчета показателя α . В качестве примера пунктиром на рис. 3 дополнительно приведены среднемесячные значения α , рассчитанные двумя другими методами: а) сначала для каждого месяца рассчитывались средние многолетние спектры АОТ, а по ним – средние значения показателя α ; б) по значениям α , представленным на сайте AERONET для каждого месяца, рассчитывались их средние многолетние значения.

Из рис. 3 следует, что в зависимости от выбранного метода расчета средние значения α могут отличаться достаточно существенно (кривые 1–3), но относительное поведение годового хода одинаково. В этой связи отметим, что существующие в настоящее время различия в расчетах показателя селективности Ангстрема (разные подходы усреднения, диапазон спектра и др.) затрудняют сравнительный анализ и интерпретацию экспериментальных данных.

Пространственные различия АОТ

В условиях образования пылевого аэрозоля наблюдаются существенные отличия от фоновых условий, однако средний уровень значений АОТ атмосферы в аридной зоне Монголии остается невысоким (рис. 4, а).

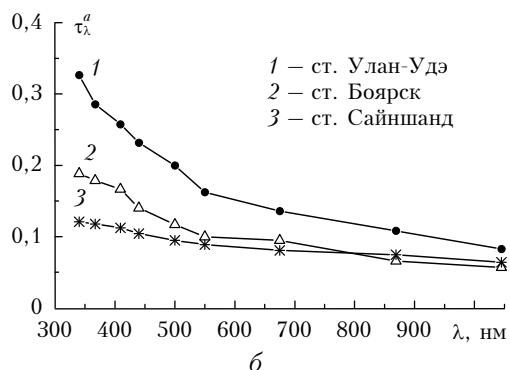
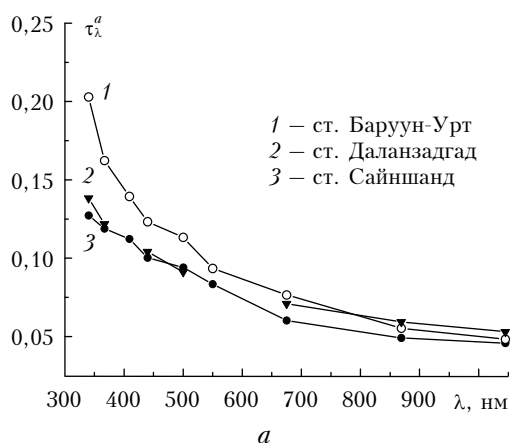


Рис. 4. Сравнение средних спектральных зависимостей АОТ на разных станциях: а – по данным измерений в Монголии в 2006 г.; б – летом 2010 г. на ст. Сайншанд (пустыня Гоби), ст. Боярск (восточное побережье оз. Байкал) и г. Улан-Удэ

Атмосфера в пустыне Гоби по сравнению с атмосферой степной зоны ст. Баруун-Урт отличается более высокой прозрачностью в видимой области спектра ($\langle \tau_{500}^a \rangle = 0,09$) и меньшей селективностью спектрального хода АОТ ($\langle \alpha \rangle = 0,56$). В ИК-диапазоне спектра АОТ атмосферы на трех станциях фотометрических наблюдений различается незначительно. Указанные особенности являются следствием низкого содержания мелкодисперсного аэрозоля в аридном районе.

Об этом же свидетельствуют результаты сравнения со спектральными зависимостями АОТ в соседнем регионе – Бурятии, расположенной в умеренной климатической зоне. На рис. 4, б представлены результаты измерений АОТ солнечным фотометром SP-7 в г. Улан-Удэ, ст. Боярск и ст. Сайншанд летом 2010 г. (июнь – август). Как видно из рис. 4, самое низкое замутнение атмосферы наблюдается в аридном районе (Сайншанд) и отличия АОТ возрастают с уменьшением длины волны: на ст. Боярск τ_{340}^a больше в $\sim 1,6$ раза, а в Улан-Удэ в $\sim 2,7$ раза.

Динамика АОТ в пылевых ситуациях

Пыльные бури в аридных районах приводят к резким контрастам прозрачности атмосферы и существенному расширению диапазона изменчивости АОТ. В качестве примера на рис. 5, а показаны временные изменения АОТ на ст. Сайншанд за период с 12 по 22 августа 2010 г., в течение которого наблюдались две пыльные бури (12, 18 августа).

На рис. 5, б представлены высотные профили коэффициента обратного рассеяния, полученные с помощью аэрозольного лидара, установленного на ст. Сайншанд в рамках программы KOSA Monitor (JICA) (<http://www.nies.go.jp>).

Как видно из рис. 5, а, во время пылевых выносов АОТ атмосферы возрастает во всем диапазоне спектра. Например, в области 500 нм АОТ увеличивается почти в 4 раза – от 0,12 до 0,44. Пылевой шлейф по данным лидарных измерений (рис. 5, б), достигал высоты 2 км, но основной вклад в формирование АОТ вносил пылевой аэрозоль, поднятый до высоты 1 км.

Динамика высотного распределения пылевого аэрозоля во время пыльной бури 12.08.2010 г. более детально иллюстрируется на рис. 6.

Из рис. 6, а видно, что в начальный период при приближении холодного фронта более плотные шлейфы пыли наблюдались в слое от 0,5 до 1,5 км. Главную роль в образовании пылевого аэрозоля и его переносе к верхней границе пограничного слоя атмосферы играют турбулентное перемешивание и вертикальная адвекция (восходящее скольжение по клину теплого воздуха). Во время прохождения фронта через пункт наблюдения происходит заполнение нижних слоев атмосферы пылевым аэрозолем, поднятым уже непосредственно вблизи пункта наблюдения. В дальнейшем, по мере смещения фронта, наблюдается постепенное осаждение аэрозоля на подстилающую поверхность.

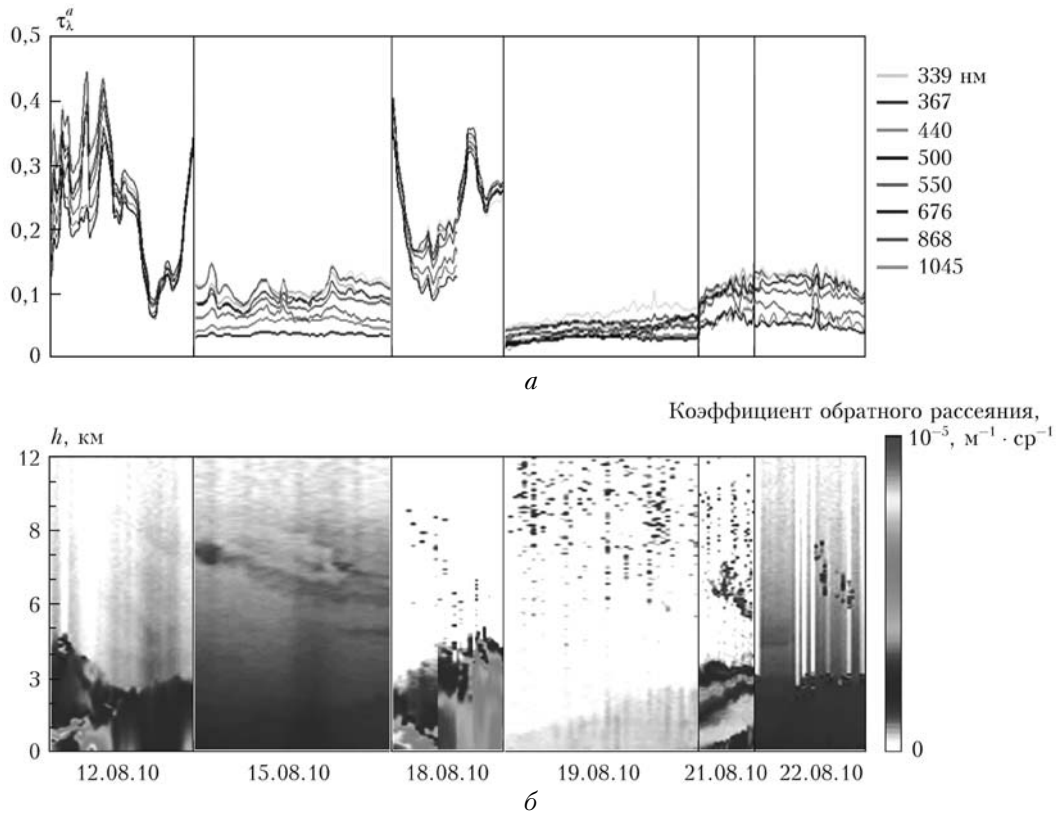


Рис. 5. Результаты одновременных измерений характеристик аэрозоля с помощью солнечного фотометра и лидара на ст. Сайншанд (12.08–22.08.2010)

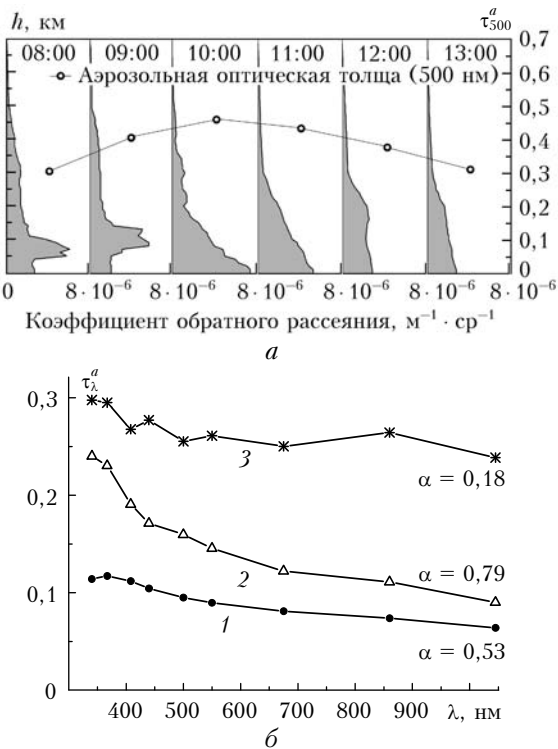


Рис. 6. Изменение характеристик аэрозоля в пылевой ситуации на ст. Сайншанд 12.08.2010: *a* – динамика высотных профилей и АОТ; *б* – трансформация спектральной зависимости АОТ (1 – чистая атмосфера; 2, 3 – начальный и конечный периоды пылевого выноса)

Трансформация спектральной зависимости АОТ атмосферы во время пыльной бури показана на рис. 6, б. В начальный период пылевого заноса более существенно увеличилась АОТ в коротковолновом диапазоне спектра и, соответственно, возросла селективность спектрального хода АОТ, что свидетельствует о преобладании в составе аэрозоля мелких частиц. Указанная динамика сопровождалась резким уменьшением содержания водяного пара и преобладающим ростом АОТ в длинноволновой области спектра. Такое поведение, по-видимому, обусловлено адсорбцией влаги мелкодисперсным аэрозолем и укрупнением частиц. В конечном счете, АОТ атмосферы в пылевой ситуации увеличилась во всем диапазоне спектра примерно на 0,17, а спектральный ход стал практически нейтральным: показатель Ангстрема уменьшился с 0,79 до 0,18.

Заключение

Аэрозольная оптическая толщина в пустыне Гоби имеет ярко выраженный годовой ход с минимумом зимой ($\tau_{500}^a = 0,04$) и максимумом в весенние и летние месяцы из-за высокой повторяемости пыльных бурь в этот период ($\tau_{500}^a = 0,15$). При этом в летние месяцы высока доля мелкодисперсного аэрозоля по сравнению с другими сезонами. Показатель селективности Ангстрема минимальный в марте ($\alpha = 0,62$) и наиболее высокий в июле – сентябре ($\alpha = 1,05$).

Сравнение АОТ в Гоби и в соседних регионах – степном районе (Баруун-Урт) и умеренной зоне (Бу-

ртия) — показало, что летом в пустыне наблюдаются более высокая прозрачность атмосферы ($\langle \tau_{500}^a \rangle = 0,09$) и меньшая селективность спектрального хода АОТ ($\langle \alpha \rangle = 0,56$), что является следствием относительно малого содержания мелкодисперсного аэрозоля. Косвенно это подтверждают и исследования счетной концентрации приземного аэрозоля. Средняя концентрация $\langle N \rangle$ мелкодисперсных частиц в диапазоне от 1,6 до 200 нм в период экспериментов 2009–2010 гг. составила 3800 см^{-3} .

Во время пылевых выносов существенные изменения претерпевают общий уровень прозрачности атмосферы и селективность спектральной зависимости АОТ. За счет повышения содержания грубодисперсных частиц АОТ увеличивается примерно на одинаковую величину во всем спектральном диапазоне, а показатель Ангрстрема приближается к нулю.

Авторы благодарят сотрудников Национального института по исследованию окружающей среды Японии в лице Масатака Нишикава, Ичиро Матсуи за полезные обсуждения результатов работы и предоставленную возможность использования данных программы KOSA Monitor (JICA).

Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 75.

1. *Полный радиационный эксперимент* / Под ред. К.Я. Кондратьева и Н.Е. Тер-Маркарянц. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 240 с.
2. *Kondratyev K.Ya. Radiation Processes in the Atmosphere* // Second IMO Lecture. WMO Publ. N 309. Geneva, 1972. 214 p.
3. *Kondratyev K.Ya. The Complete Atmospheric Energetics Experiment*. GARP Publ. Ser. WMO. Geneva, 1973. N 12. 43 p.
4. *Kondratyev K.Ya. Climatic Effects of Aerosols and Clouds*. Springer/PRAXIS. Chichester, U.K. 1999. 264 p.
5. *Кондратьев К.Я., Жвалев В.Ф.* Первый глобальный эксперимент ПИГАП. Аэрозоль и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 167 с.
6. *Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля: Сб. научных трудов* / Под ред. Г.С. Голицына. СПб.: НПО «Тайфун», 1992. 200 с.
7. *Reid J.S., Jonsson H.H., Maring H.B., Smirnov A., Savoie D.L., Cliff S.S., Reid E.A., Livingston J.M., Meier M.M., Dubovik O., Tsay S.C.* Comparison of size and morphological measurements of coarse mode dust particles from Africa // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 19. P. PRD 9/1–PRD 9/20.
8. *Tanré D., Haywood J., Pelon J., Leon J.E., Chatenet B., Formenti P., Francis P., Goloub P., Highwood E.J., Myhre G.* Measurement and modeling of the Saharan dust radiative impact: Overview of the Saharan Dust Experiment (SHADE) // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 18. P. SAH 1/1–SAH 1/12.
9. *Formenti P., Elbert W., Maenhaut W., Haywood J., Andreae O.M.* Chemical composition of mineral dust aerosol during the Saharan Dust Experiment (SHADE) airborne campaign in the Cape Verde region, September 2000 // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 18. P. SAH 3/1–SAH 3/15.
10. *Haywood J., Francis P., Osborne S., Glew M., Loel N., Highwood E., Tanré D., Myhre G., Formenti P., Hirst E.* Radiative properties and direct radiative effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during SHADE: 1. Solar spectrum // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 18. P. SAH4/1–SAH4/16.

11. *Zhang X.Y., Gong S.L., Shen Z.X., Mei F.M., Xi X.X., Liu L.C., Zhou Z.J., Wang D., Wang Y.Q., Cheng Y.* Characterization of soil dust aerosol in China and its transport and distribution during ACE-Asia: 1. Network observations // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 9. P. ACH3/1–ACH3/13.
12. *Li L.P., Fukushima H., Fronin R., Mitchell B.G., He M.-X., Uno U., Takamuro T., Ohta S.* Influence of submicron absorptive aerosol on Sea-viewing Wide Field of View Sensor (SeaWiFS) – derived marine reflectance during Aerosol Characterization Experiment (ACE)-Asia // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 15. P. AAC13/1–AAC13/11.
13. *Mader B.T., Flagan R.C., Seinfeld J.H.* Airborne measurements of atmospheric carbonaceous aerosols during ACE-Asia // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107, N 23. P. AAC13/1–AAC13/21.
14. *Кондратьев К.Я.* От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия возмущений атмосферного аэрозоля. 1. Полевые наблюдательные эксперименты. Африка и Азия // *Оптика атмосф. и океана.* 2004. Т. 17, № 9. С. 699–714.
15. *Cahill C.F.* Asian aerosol transport to Alaska during ACE-Asia // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 23. P. ACE32/1–ACE32/8.
16. *Matsumoto K., Uyama Y., Hayano T., Tanimoto H., Uno I., Uematsu M.* Chemical properties and outflow patterns of anthropogenic and dust particles on Rishiri Island during the Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment (ACE-Asia) // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 23. P. ACE34/1–ACE34/15.
17. *Dubovik O., Jefferson A.* Column closure studies of lower tropospheric aerosol and water vapor during ACE-Asia using airborne Sun photometer and airborne in situ and ship-based lidar measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 23. P. ACE24/1–ACE24/22.
18. *Uno I., Harada K., Satake S., Hara Y., Wang Z.* Meteorological characteristics and dust distribution of the Tarim Basin simulated by the nesting RAMS/CFORS dust model // *J. Meteorol. Soc. Jap.* 2005. V. 83. P. 219–239.
19. *Xu J., Bergin M.H., Greenwald R., Schauer J.J., Shafer M.M., Jaffrezo J.L., Aymoz G.* Aerosol chemical, physical, and radiative characteristics near a desert source region of northwest China during ACE-Asia // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109, N 19. P. D19303/1–D19303/14.
20. *Eck T.F., Holben B.N., Dubovik O., Smirnov A., Goloub P., Chen H.B., 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.* 2005. V. 110, D06202, doi: 10.1029/2004JD005274.
21. *Kim S.-W., Yoon S.-C., Kim J., Kim S.-Y.* Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over East Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41. P. 1634–1651.
22. *Murayama T., Sugimoto N., Uno I., Kinoshita K., Aoki K., Hagivara N., Matsui I., Sakai T., Shibata T., Arao K., Sohn D.-J., Won J.-G., Yoon S.-C., Li T., Zhou J., Hu H., Abo M., Iokibe K., Koga R., Iwasaka Y.* Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia // *J. Geophys. Res. D.* 2001. V. 106, N 16. P. 18345–18359.
23. *Kim D.-H., Sohn B.-J., Nakajima T., Takamura T., Choi B.-C., Yoon S.-C.* Aerosol optical properties over East Asia determined from ground-based sky radiation

- measurements // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, D02209, doi: 10.1029/2003JD003387.
24. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 14, № 17. С. 355–360.
25. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Полькин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тацилин М.А. Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 11. С. 968–975.
26. Климаты аридной зоны Азии / Отв. ред. Е.А. Востокова, П.Д. Гунин. М.: Наука, 2006. 359 с.
27. Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Маркелов Ю.И., Михалев А.В., Николашкин С.В., Панченко М.В., Поддубный В.А., Полькин В.В., Смирнов А., Тацилин М.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Холбен Б., Еремина Т.А. Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 566–574.

A.S. Zayakhanov, G.S. Zhamsueva, S.A. Naguslaev, V.V. Tsydyrov, A.A. Ayurzhanayev, S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, D. Azzayaa, D. Oyunchimeg. Spatiotemporal characteristics of atmospheric AOD in the Gobi desert according to data of ground-based observations.

Results of study of the aerosol optical depth (AOD) in the atmosphere of arid zone of Mongolia are discussed. The sites of the photometric observations were located on the territory of Gobi desert and included the Dalanzadgad, Sainshand, and Baruun-Urt stations. The seasonal and interannual AOD variations were analyzed using data of multiyear observations at AERONET station in Dalanzadgad for the period from 1997 to 2010. It is found that there is, on the average, high atmospheric transparency (average AOD in the region of $0.5 \mu\text{m}$ is 0.09) with a pronounced annual behavior in the Gobi desert; the maximum is observed in spring and summer months due to high frequency of occurrence of dust storms in this period, and the minimum is observed in winter months. The fraction of finely dispersed aerosol is large during summer months compared to other seasons. We analyzed the spectral features of the atmospheric AOD under the conditions of dust outbreaks and the spatial differences in different climatic zones: under the conditions of dry climate of arid zone of Mongolia and temperate climatic zone of Baikal region.