

УДК 551.521.3 (575.2)(04)

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ
И ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
МНОВОВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Б.Б. Чен, Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев

Представлены модели оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в слое активного турбулентного перемешивания и в свободной тропосфере при переносе загрязнения на Центральную Азию из различных источников.

Ключевые слова: лидар; загрязнение; аэрозоль; перенос; источник; оптические и физические характеристики; модель.

Введение. Известно, что аэрозольно-радиационное отрицательное влияние сравнимо с положительным воздействием парниковых газов [1], которое является результатом прямого аэрозольного эффекта за счет рассеяния и поглощения аэрозолями солнечного излучения, и косвенного эффекта за счет способности аэрозоля влиять на образование облаков и радиационные свойства [2]. Эти эффекты происходят главным образом в пределах и выше планетарного пограничного слоя (PBL).

В силу этого возникает большая неопределенность в прогнозировании радиационного влияния аэрозоля из-за различий в вертикальных профилях аэрозоля, применяемых в моделях [1]. Наше знание о свойствах аэрозоля по высоте, как установлено в [1], по большей части ограничено локальными наблюдениями, выполненными с помощью воздушных шаров или инструментов, размещенных на самолетах [3, 4].

Возможность получения информации о пространственной структуре, оптических и физических свойствах аэрозолей с помощью наземного дистанционного многоволнового лазерного зондирования позволяет не только идентифицировать аэрозольные слои, но также изучать процессы переноса и снизить неопределенности в оценках радиационного воздействия, чувствительного к вертикальному распределению аэрозоля [5]. Особое значение контроль вертикальной структуры аэрозоля имеет на участках, близко расположенных к основным областям эмиссии пыли [6].

Получение таких данных имеет особое значение для Азиатского континента из-за наличия обширных территорий с высоким уровнем эмиссии аэрозоля. Так, по оценкам для восточной Азии [7], концентрация аэрозолей в тропосфере продолжает расти и может увеличиться к 2040 г. в два-четыре раза по отношению к уровню 1990 г.

Лидарная станция Теплоключенка (ЛСТ) КРСУ является единственной в Центральной Азии точкой, где проводятся измерения характеристик атмосферного аэрозоля с использованием многоволновой лазерной системы. Расположение ЛСТ в непосредственной близости от крупнейших очагов эмиссии пыли и Атмосферных Коричневых Облаков (АВК) – бассейна Аральского моря и пустыни Такла-Макан определяет существенную роль ЛСТ в изучении закономерностей переноса загрязнения на территорию Центральной Азии и его влияния на экологическую ситуацию региона.

В настоящей работе представлены результаты выявленных закономерностей распределения оптических и физических характеристик аэрозоля в PBL и свободной тропосфере при переносах загрязнения из различных источников. Анализу подвергнуты результаты лидарных измерений в период с июня 2008 по май 2009 г., дополненные фотометрическими (Microtops II) и гравиметрическими (TEOM/FDMS) данными.

Оборудование, методология измерения. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля были восстановлены по сигналу обратного рассеяния многоволнового лидара ($\lambda=355$,

532, 1064 нм). Лидар имеет каналы поляризации ($\lambda=532$ нм) и комбинационного (Рамановского) рассеяния атмосферным азотом ($\lambda=387$ нм). Относительный вклад несферических частиц в сигнал обратного рассеяния контролировался на основе поляризационных измерений. Это известная и распространенная конфигурация измерительных каналов для зондирования аэрозоля пограничного слоя и свободной тропосферы ($0,8 \text{ км} \leq h_1 \leq 12,0 \text{ км}$). Измерения, включающие регистрацию комбинационного рассеяния (КР) посредством Рамановского канала ($\lambda=387$ нм), выполнялись в ночное время.

В непосредственной близости от лидарного комплекса проводились измерения полной аэрозольной оптической толщины атмосферы (AOD) на нескольких длинах волн ($\lambda=340, 380, 500, 675, 870$ и 1020 нм) с помощью солнечного фотометра и озонметра Microtops II. При проведении совместных лидарных и фотометрических измерений время работы лидара синхронизировалось с работой солнечного фотометра. Основное внимание уделялось наблюдениям во время аномальных событий, характеризующихся значительным изменением оптического состояния атмосферы, таких как пылевые выносы, Атмосферное Коричневое Облако (ABC).

Регистрация сигналов обратного рассеяния производилась в аналоговом режиме, а комбинационного рассеяния (КР) – в режиме счета фотонов. Частота повторения лазерных импульсов для всех режимов работы составляла 9–10 Гц, а пространственное разрешение сигналов – 15–30 м.

Для восстановления оптических характеристик аэрозоля использован метод совместной обработки лидарных и фотометрических измерений как при наличии сигнала КР, так и без него. Метод разработан в рамках выполнения проекта МНТЦ #KR-1522 в связи с отсутствием солнечного радиометра CIMEL.

Методика восстановления микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля вдоль трассы зондирования изложена в [8, 9].

Использовано линейное деполаризационное отношение D , определяемое как отношение между поперечным (\perp) и параллельным (\parallel) поляризованными сигналами обратного рассеяния $D=S_{\perp}/S_{\parallel} \propto (\beta_{\perp a} + \beta_{\perp m})/(\beta_{\parallel a} + \beta_{\parallel m})$, вместо деполаризации частиц D_a , так как последняя становится очень неустойчивой при низком содержании аэрозоля (небольшой $\beta_{\parallel a}$). Применена также “фильтрация облачности”, т. е. отобраны измерения AOD в условиях, свободных от облаков и перистой облачности, проведенные с по-

мощью солнечного фотометра в пределах одного часа совместно с лидаром. Ожидаемая точность измерений фотометром AOD оценивается в $\pm 0,02$ [10].

При идентификации слоев аэрозоля, в частности, пылевого и ABC, были привлечены, кроме результатов наземных лидарных многоволновых и поляризационных измерений, и данные спутникового лидара CALIPSO, а также данные аэрозольных моделей NAAPS и обратного траекторного анализа по модели HYSPLIT-4 [11].

Источники аэрозоля. Выделены следующие основные источники загрязнения воздушных масс, которые относятся к географическим областям, являющимся очагами их формирования:

S1: Южная Азия (в том числе Центральноазиатский горный массив, пустыня Такла-Макан);

S2: Ближний Восток (в том числе пустыни Ливии, Аравии, Иранского нагорья);

S3: Бассейн Аральского моря (в том числе Западный Казахстан, пустыни Каракум, Кызылкум);

S4: Восточная Европа и европейская часть России, Западная Сибирь и Восточный Казахстан (в том числе Казахский мелкосопочник, пустыни Бетпак-Дала, Мойынкум и Таукум).

Исходя из анализа обратных траекторий и источников аэрозольного загрязнения, выделены следующие виды переноса загрязнения на регионы Центральной Азии:

- Региональный перенос загрязнения – RTP (Regional Transport of Pollution) из источников S1 и S3;
- Дальний перенос загрязнения – LTP (Long-range Transport of Pollution) из источника S2;
- Трансграничный перенос загрязнения – TTP (Transboundary Transport of Pollution) из источника S4.

При анализе лидарных измерений установлено, что перенос загрязнения осуществляется также из Ферганской долины в виде антропогенного аэрозоля. Этот вид переноса был выделен в отдельный региональный перенос из Ферганской долины. Очень часто этот перенос происходил совместно с LTP из источника S2. В этих случаях в составе загрязнения увеличивалась доля частиц мелкодисперсной фракции.

Результаты

Планетарный пограничный слой. Результаты регулярных лидарных измерений, приведенные ниже, относятся к диапазону высот, ограниченному уровнем, ниже которого в отсутствие об-

лаков содержится большая часть атмосферного аэрозоля [12]. Этот диапазон высот представляет Planetary Boundary Layer (PBL) или слой активного турбулентного перемешивания (Active Turbulent Mixing Layer – ATML). Высота PBL обычно ограничена уровнями 1,0–1,8 км зимой и 2,0–3,5 км летом со средними значениями $1,5 \pm 0,5$ и $3,0 \pm 0,8$ км, соответственно [8]. На рис. 1 показана изменчивость высоты PBL и интегрального аэрозольного обратного рассеяния (IB532) на $\lambda=532$ нм в диапазоне высот от 0,8 км до верхней границы PBL. Видно, что в течение летнего периода средняя величина интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния $1,2 \pm 0,58$ (10^{-3} sr $^{-1}$) превышает аналогичные показатели для зимы $0,38 \pm 0,28$ (10^{-3} sr $^{-1}$).

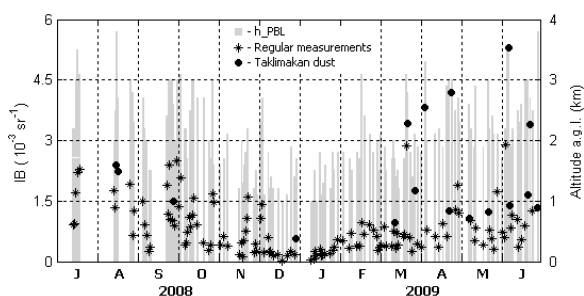


Рис. 1. Высота пограничного слоя и интегральное обратное рассеяние аэрозоля на $\lambda=532$ нм. Июль 2008 – июнь 2009 г.

Оптические характеристики атмосферного аэрозоля, полученные для безоблачных дней в летний и зимний период, представлены в табл. 1.

Функции распределения объема аэрозольных частиц по размерам при всем их разнообразии в большинстве случаев были бимодальными и характеризовались достаточно устойчивым положением мод. Параметры распределения, а именно, модальные радиусы тонкодисперсной (r_f) и крупной (r_c) фракций, ширины распределения (σ_f и σ_c), отношение объемов мелкой и крупнодисперсной фракций V_f/V_c , а также значения действительной (n) и мнимой (k) части комплексного показателя преломления приведены в табл. 2.

Видно, что в PBL преобладают аэрозольные частицы органической компоненты (мелкодисперсная фракция с примесью сажи – элементного углерода и сульфатов) и минеральной крупнодисперсной преимущественно пыли. Выше PBL – пылевые частицы с примесью мелких частиц в виде сульфатов.

В целом, основная доля аэрозольных частиц, формирующих оптические характеристики, сосредоточена в PBL, выше которого, как правило, спектральные коэффициенты рассеяния резко убывают с высотой.

Аналогичные результаты получены для пылевых выносов в Средней Азии и Сахаре [7].

Самолетные измерения вертикальной структуры микрофизических и оптических характеристик

Таблица 1

Оптические характеристики аэрозоля в PBL и в свободной тропосфере

		$\beta_a(355)$, км $^{-1}$ ср $^{-1}$	$\beta_a(532)$, км $^{-1}$ ср $^{-1}$	$\beta_a(1064)$, км $^{-1}$ ср $^{-1}$	AOD_{532}	LR_{532} , ср
Лето	PBL	$(2,3 \pm 0,9) \times 10^{-3}$	$(5,1 \pm 2,1) \times 10^{-4}$	$(3,4 \pm 1,1) \times 10^{-4}$	$0,062 \pm 0,038$	36 ± 25
	FT	$(1,0 \pm 0,5) \times 10^{-3}$	$(2,4 \pm 0,9) \times 10^{-4}$	$(1,1 \pm 0,5) \times 10^{-4}$	$0,028 \pm 0,016$	
Зима	PBL	$(1,2 \pm 0,6) \times 10^{-3}$	$(2,2 \pm 0,6) \times 10^{-4}$	$(1,9 \pm 0,7) \times 10^{-4}$	$0,025 \pm 0,014$	43 ± 21
	FT	$(0,9 \pm 0,3) \times 10^{-3}$	$(1,9 \pm 0,5) \times 10^{-4}$	$(1,0 \pm 0,3) \times 10^{-4}$	$0,020 \pm 0,012$	

Таблица 2

Микрофизические характеристики аэрозоля в PBL и в свободной тропосфере

	V_f/V_c	r_f , μm	σ_f	r_c , μm	σ_c	n	k
PBL	0,1–0,3	0,08–0,11	1,6–1,7	3,0–3,5	1,3–1,6	1,45–1,55	0,006–0,04
FT	~2,0	0,10–0,13	1,7–1,9	2,4–3,0	1,4–1,8	1,60	0,005

пылевого аэрозоля в Средней Азии, проведенные в конце XX-го столетия, позволили предположить оптически однородную модель распределения пыли в атмосфере до высот 2–4 км [8].

В табл. 3 представлены модели оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в PBL при региональном переносе загрязнения (RTP) на Центральную Азию.

Свободная тропосфера. Результаты лидарных измерений интегрального коэффициента обратного рассеяния (IB) в диапазоне высот от верхней границы PBL до 10,0 км на длине волны 532 нм в период с июля 2008 по июнь 2009 г. показаны на рис. 2. Как видно, большая часть лидарных измерений представляет атмосферные условия с переносом воздушных масс с низкой аэрозольной нагрузкой. Примерно для 65% из-

мерений значения интегрального коэффициента обратного рассеяния $IB_{532} < 0,005 \text{ sr}^{-1}$.

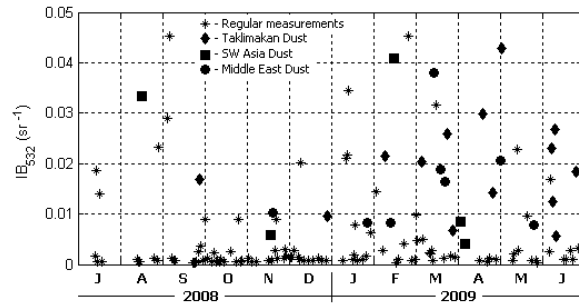


Рис. 2. Интегральное обратное рассеяние аэрозоля на $\lambda=532 \text{ нм}$ в свободной тропосфере. Июль 2008 – июнь 2009 г.

Таблица 3

Оптические и микрофизические свойства азиатской пыли в PBL при региональном переносе загрязнения

RTP			
Параметр	Значение	Параметр	Значение
PBL верх. граница H_{PBL} , km	$2,7 \pm 0,2$	PM2,5/PM10, %	$44,3 \pm 2,8$
$IB_{532} * 10^{-3}$, sr ⁻¹	$2,19 \pm 0,33$	SSA500	$0,957 \pm 0,011$
DRmax	$0,08 \pm 0,004$	Vf/Vc	$0,1 \div 0,3$
LR, sr	33 ± 3	rf, μm	$0,08 \div 0,11$
AOD532	$0,07 \pm 0,01$	σ_f	$1,6 \div 1,7$
AOD500	$0,28 \pm 0,05$	rc, μm	$3,0 \div 3,5$
A380/870	$0,20 \pm 0,09$	σ_c	$1,3 \div 1,6$
α , km ⁻¹	$0,033 \pm 0,003$	n	$1,45 \div 1,55$
PM10, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	$30,1 \pm 4,4$	k	$0,006 \div 0,04$

Примечание: здесь и в табл. 4

IB_{532} – интегральный коэффициент обратного рассеяния в слое на длине волны 532 нм;

DRmax – максимальное значение деполяризационного отношения в слое на длине волны 532 нм;

$A_{532/1064}$ – параметр Ангстрема в слое, вычисленный по коэффициенту обратного рассеяния;

LR(532) – лидарное отношение в слое на $\lambda=532 \text{ нм}$;

AOD_{532} – аэрозольная оптическая толщина в слое на $\lambda=532 \text{ нм}$;

AOD_{500} – AOD на $\lambda=500 \text{ нм}$;

$A_{380/870}$ – параметр Ангстрема в диапазоне длин волн 380–870 нм;

α – коэффициент ослабления в слое на $\lambda=532 \text{ нм}$;

PM10 – массовая концентрация PM10;

PM2,5/PM10 – отношение массовых концентрации – массовый коэффициент;

SSA500 – альбеда однократного рассеяния на $\lambda=500 \text{ нм}$;

V_f/V_c – отношение объемных концентраций мелкой и крупнодисперсной фракций в слое переноса загрязнения;

r_f, r_c – модальные радиусы тонкодисперсной и крупной фракций;

σ_f, σ_c – ширина моды тонкодисперсной и крупной фракций;

n, k – действительная и мнимая части комплексного показателя преломления на $\lambda=532 \text{ нм}$.

Аэрозольные слои характеризовались изменением IB_{532} от $5,0 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$ до $4,5 \times 10^{-2} \text{ sr}^{-1}$ со средним значением $\sim 2,3 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$ на 532 нм. Большинство случаев с высокой аэрозольной нагрузкой приходится на период с февраля по июнь 2009 г. Наблюдаемый широкий диапазон вариации интегрального обратного рассеяния аэрозоля в свободной тропосфере отражает естественную изменчивость атмосферных условий и влияние процессов переноса аэрозоля с нескольких направлений различной интенсивности.

В табл. 4 приведены модели оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в сло-

ях переноса загрязнения выше слоя PBL (свободная тропосфера).

Обсуждение. Пыль представляет оптически значимый слой атмосферы в регионе. Так, из 241 дня измерений на лидарной станции 79 дней были с пылью, т.е. почти 33% дней, с максимальной частотой весной 2009 г. (39 дней из 79 дней), т.е. около 50%.

Из представленных в табл.2 и 3 данных следует:

Такла-Макан характеризуется выносами загрязнения с максимальными значениями массовой концентрации PM10, аэрозольной оптиче-

Таблица 4

Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в слоях переноса загрязнения в свободной тропосфере

Параметр	RTP (Такла-Макан)	RTP (Фергана)	LTP (теплый период)	LTP +TTP (холод. период)	LTP +TTP
Ниж. высота, km	2,7 ± 0,3	4,1±1,1	4,6±0,4	5,0±0,6	4,8±0,4
Верх. высота, km	4,8±0,7	5,1±0,9	8,2±0,5	7,1±0,4	7,6±0,4
Dh, km	2,1±0,5	1,1±0,2	3,6±0,5	2,1±0,4	2,8±0,4
IB532*10-3, sr-1	0,0238±0,0070	0,0008±0,0001	0,0156±0,0063	0,0099±0,0039	0,0125±0,0035
DRmax	0,09±0,01	0,07±0,01	0,11±0,00	0,10±0,01	0,10±0,00
LR, sr	17,57±3,15	34,50±3,50	13,67±3,77	16,29±1,60	15,08±1,89
AOD532	0,31±0,06	0,03±0,01	0,12±0,04	0,13±0,03	0,12±0,02
AOD500	0,37±0,09	0,26	0,20±0,04	0,20±0,04	0,20±0,02
A380/870	0,06±0,05	1,30	0,25±0,17	0,51±0,10	0,40±0,10
α , km-1	0,157±0,034	0,025±0,003	0,048±0,024	0,073±0,021	
PM10, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35,7±5,7	11,9±1,4	20,9±5,0	8,7±1,5	14,3±2,9
PM2.5/PM10, %	42,1±2,7	56,9±0,9	45,2±1,5	64,2±2,7	55,4±3,1
SSA500	0,971±0,005	0,994±0,007	0,971±0,016	0,995±0,003	0,984±0,008
Vf/Vc	0,62±0,14	2,80±2,20	1,55±0,26	2,05±0,49	1,80±0,27
rf, μm	0,36±0,08	0,12±0,00	0,22±0,06	0,19±0,05	0,20±0,04
σ_f	1,41±0,09	1,65±0,45	2,13±0,58	2,06±0,30	2,09±0,30
rc, μm	2,68±0,51	1,10±0,60	3,07±0,35	3,00±0,52	3,03±0,30
σ_c	2,38±0,40	1,70±0,30	2,20±0,37	1,78±0,17	1,99±0,20
n	1,54±0,04	1,51±0,07	1,52±0,04	1,46±0,03	1,49±0,03
k	0,021±0,008	0,003±0,002	0,015±0,009	0,012±0,008	0,014±0,006

ской толщины, коэффициента ослабления, интегрального коэффициента обратного рассеяния в слое PBL, а также минимальными значениями массового коэффициента и параметра Ангстрема. Верхняя граница слоев переноса самая низкая (около 4,8 км), по сравнению с таковой в других источниках. Это объясняется тем, что из этого источника выносятся в основном пылевой аэрозоль, который намного тяжелее антропогенного мелкодисперсного. При этом в нормальных условиях в слое PBL преобладают аэрозольные частицы органической компоненты (мелкодисперсная фракция с примесью сажи – элементарного углерода и сульфатов) и минеральной, преимущественно крупнодисперсной, пыли. Выше слоя PBL – пылевые частицы с примесью мелких частиц в виде сульфатов. При этом из 241 дня измерений на ЛСТ 76 дней (31,5%) наблюдались переносы мелкодисперсного аэрозоля в виде сульфатов, из которых на долю осеннего периода приходится 41%, зимнего – 30% и летнего – 25% дней.

Как уже упоминалось, основная доля аэрозольных частиц, формирующих оптические характеристики, сосредоточена в слое PBL, выше которого, как правило, спектральные коэффициенты рассеяния резко убывают с высотой. Аналогичные результаты получены для пылевых выносов в Средней Азии и Сахаре.

При дальнем переносе пылевого аэрозоля из Ближнего Востока (Middle East) высота слоев переноса – около 7,6 км и выше в результате того, что наиболее тяжелые частицы претерпевают гравитационное осаждение и вымывание осадками вдоль трассы переноса. При этом наблюдается существенное различие в характеристиках аэрозоля в теплый и холодный периоды. Так, в холодный период эмиссия пыли низкая и в переносимой воздушной массе преобладают частицы мелкодисперсной фракции. Об этом свидетельствуют низкие значения интегрального коэффициента обратного рассеяния в слое PBL (0,009), коэффициента замутнения атмосферы, массовой концентрации PM10 и высокие значения параметра Ангстрема (около 0,51) и массового коэффициента (64%). При переходе с холодного на теплый период активность пылевых бурь возрастает, что приводит к доминированию крупнодисперсных пылевых частиц в воздушных массах западного направления, что сказывается на толщине слоя, оптических и микрофизических характеристиках. В частности, лидарное отношение в слое переноса падает с 16,3 в холодный период до 13,7 в теплый период, а интегральный

коэффициент обратного рассеяния в слое возрастает до 0,015.

Особо следует отметить региональный источник антропогенного аэрозоля – Ферганскую долину. Большая плотность населения в регионе, а также действующие предприятия, особенно химической промышленности, обуславливают условия для интенсивных выбросов антропогенного аэрозоля в виде сажи, окислов азота и т.д. Определение загрязнения от этого источника довольно проблематично при использовании только фотометрических и гравиметрических измерений. Это связано с тем, что загрязнения от этого источника переносятся не напрямую, а вместе с воздушными массами западного и юго-западного направлений, которые в своем составе содержат загрязнения из других источников. При этом характеристики воздушного загрязнения от этого источника маскируются более мощным по продолжительности и интенсивности переносом с западного направления (Middle East).

Для пылевого аэрозоля с пустынь Такла-Макан (RTP) и Среднего Востока (LTP) характерны одинаковые значения альbedo однократного рассеяния SSA в слое переноса – 0,971. Для LTP среднее значение SSA в холодный период (0,995) больше, чем в теплый период. Это связано с тем, что в теплый период осуществляется в основном вынос пылевого аэрозоля, у которого значения SSA меньше по сравнению с таковым у сульфатного аэрозоля, характерным для холодного периода. В терминах радиационного форсинга, сульфаты, как частицы, сильно рассеивающие приходящую солнечную радиацию, создают так называемый охлаждающий эффект.

При RTP наблюдается большая поглощательная способность загрязнения ($\kappa=0,021$), чем при LTP ($\kappa=0,014$). Причиной этого является то, что при LTP в составе аэрозольных слоев есть не только пыль, которая в основном поглощает радиацию, но и сульфаты, существенно рассеивающие ее.

Разница в значениях мнимой части показателя преломления в холодный ($\kappa=0,012$) и теплый период ($\kappa=0,015$) связана с сезонной изменчивостью переносов с западного направления. В холодный период эмиссия пыли низка (уменьшается поглощательная способность), а выбросы сульфатов увеличиваются (увеличивается рассеивающая способность).

Наблюдающиеся различия в величинах альbedo однократного рассеяния, таким образом, связаны с разными поглощательными способнос-

тями аэрозоля в слоях переноса из различных источников.

Отношение объемных концентраций V_f/V_c меньше 1 для пылевого регионального аэрозоля и больше 1 для регионального антропогенного и аэрозоля дальнего переноса. Причем в холодный период это отношение ($V_f/V_c = 2,05$) больше, чем в теплый период ($V_f/V_c = 1,55$) вследствие большего содержания мелкодисперсных частиц в слоях переноса в холодное время.

Распределения частиц по размерам в слоях переноса загрязнения подчиняются логнормальному закону распределения случайных величин с двумя модами: в области пылевой фракции и в области тонкодисперсных частиц. Самым малым размером частиц обладает региональный антропогенный аэрозоль. Мелкодисперсная фракция имеет средний модальный радиус 0,12 мкм.

Заключение

Полученные закономерности пространственного распределения оптических и физических свойств аэрозолей с помощью многоволнового лазерного зондирования позволяют идентифицировать аэрозольные слои и изучить процессы переноса загрязнения из основных источников на Центральную Азию. Выявленные закономерности распределения оптико-физических характеристик по вертикали позволят снизить неопределенности в оценках радиационного воздействия, чувствительного к вертикальному распределению аэрозоля, и могут быть успешно применены при моделировании влияния аэрозольного загрязнения на климатические изменения, гидрологический цикл, сельское хозяйство, качество воздуха, здоровье людей и т.д.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта МНТЦ #KR-1522.

Литература

1. Penner, J. E., Andreae, M., Annegarn, H., Barrie, L., Feichter, J., Hegg, D., Jayaraman, A., Leaitch, R., Murphy, D., Nganga, J., and Pitari, G.: Aerosols, their Direct and Indirect Effects, In *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
2. Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., and Rosenfeld, D.: Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle, *Science*, 294, 2119–2124, 2001.
3. Hofmann, D. J.: Twenty years of balloon-borne tropospheric aerosol measurements at Laramie, Wyoming, *J. Geophys. Res.*, 98, 12 753–12 766, 1993.
4. de Reus, M., Krejci, R., Williams, J., Fischer, H., Scheele, R., and Strom, J.: Vertical and horizontal distributions of the aerosol number concentration and size distribution over the northern Indian Ocean, *J. Geophys. Res.*, 106, D22, 28 629–28 641, 2001.
5. Huang J., Q. Fu, J. Su, Q. Tang, P. Minnis, Y. Hu, Y. Yi, Q. Zhao: Taklimakan dust aerosol radiative heating derived from CALIPSO observations using the Fu-Liou radiation model with CERES constraints, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 4011–4021, 2009.
6. Papayannis A., Zhang H.Q., Amiridis V., Ju H.B., Chourdakis G., Georgoussis G., Perez C., Chen H.B., Goloub P., Mamouri R.E., Kazadzis S., Paronis D., Tsaknakis G., and Baldasano J.M. Extraordinary dust event over Beijing, China, during April 2006: Lidar, Sun photometric, satellite observations and model validation, *J. Geophys. Res.*, Vol. 34, L07806, doi:10.1029/2006GL029125, 2007.
7. Wolf, M. E., and G. M. Hidy: Aerosols and climate: Anthropogenic emissions and trends for 50 years, *J. Geophys. Res.*, 102(D10), 11,113–11,121, 1997.
8. Chen B.B., Sverdlik L.G, Kozlov P.V.: Optics and microphysics of atmospheric aerosol, Bishkek, 222 P., 2004.
9. Korshunov V.A. Multiwavelength lidar sensing of tropospheric aerosol using Raman scattering signals. *J. Optics of atmosphere and ocean*, 19. №5. P.422–427, 2006.
10. Sakai, T., Shibata, T., Kwon, S., Kim, Y., Tamura, K., and Iwasaka, Y.: Free tropospheric aerosol backscatter, depolarization ratio, and relative humidity measured with the Raman lidar at Nagoya in 1994–1997: contributions of aerosols from the Asian continent and the Pacific ocean, *Atmos. Env.*, 34, 431–442, 2000.
11. Gobbi, G. P., Barnaba, F., Giorgi, R., Santacasa, A.: Altituderesolved properties of a Saharan-Dust event over the Mediterranean, *Atmos. Environ.*, 34, 5119–5127, 2000.
12. Sassen, K: Indirect climate forcing over the western US from Asian dust storms, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10, 10.1029/2001GL014051, 2002.