

**ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ И
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ НАН КР И КРСУ им. Б.Н. ЕЛЬЦИНА**

Диссертационный совет Д.01.12.041

На правах рукописи

УДК: 504.3.054: 551.510.42: 504.064.37

Имашев Санжар Абылбекович

**РЕГИОНАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ И ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ТРОПОСФЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Бишкек – 2013

Работа выполнена в Кыргызско-Российском Славянском Университете на кафедре физики и микроэлектроники

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Чен Борис Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
заслуженный деятель науки КР
Каримов Казимир Абдулович

доктор физико-математических наук
Погребной Валентин Николаевич

Ведущая организация: Научная станция РАН в г. Бишкек
720049, с. Кой-Таш

Защита состоится 1 ноября 2013 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д.01.12.041 при Институте физико-технических проблем и материаловедения Национальной Академии Наук Кыргызской Республики и КРСУ им. Б.Н. Ельцина по адресу: г. Бишкек, 720071, проспект Чуй, 265-а. тел.: 39-20-35.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке Национальной Академии Наук Кыргызской Республики.

Автореферат разослан 27 сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук

Урусова Т.Э.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Взвешенные в атмосфере частицы различных веществ - аэрозоли играют важную роль в изменении погоды и климата, качестве воздуха, здоровье людей и других процессах.

Сложность аэрозольных процессов в окружающей среде является настолько огромной, что приводит к большой неопределенности в количественном понимании их роли во многих экологических проблемах. Например, влияние аэрозольного загрязнения на перенос солнечной радиации и сопутствующие этому эффекты в настоящее время являются одним из основных источников неопределенности в нашем понимании изменения климата. В значительной мере это относится к Азиатскому региону, где быстрый рост промышленности и численности населения приводит к существенному увеличению выбросов загрязнения в атмосферу, что негативным образом сказывается как на окружающей среде, так и на здоровье людей. Благодаря воздушному переносу и значительному времени жизни в атмосфере, аэрозольные и газовые примеси, а также продукты их разложения распространяются на огромные расстояния от источников их первоначального выброса, тем самым затрагивая и те районы, которые ранее считались относительно чистыми.

В первом десятилетии XXI столетия наблюдалось существенное изменение в подходах к управлению и использованию наземных наблюдений совместно с моделями погоды и климата. Так, целью создания глобальной лидарной сети GALION является получение вертикального распределения аэрозольной составляющей атмосферы (прежде всего, профилей оптических и микрофизических свойств) посредством лазерного дистанционного зондирования сетью наземных станций. Наблюдения будут проводиться с достаточным охватом, разрешением и точностью для решения вопросов климатологии аэрозоля, оценки эксплуатационных качеств моделей, сопровождения и дополнения спутниковых наблюдений и обеспечения исходными данными прогностических моделей "химической погоды".

Актуальность темы исследований обусловлена необходимостью детального знания для региона характеристик атмосферного загрязнения для решения задач моделирования процессов переноса и трансформации тропосферного загрязнения, а также для оценки влияния воздушного загрязнения на качество воздуха, радиационный баланс атмосферы и гидрологический цикл.

Связь темы диссертации с крупными научными программами. Исследования по теме диссертации проведены в рамках выполнения проектов Международного научно-технического центра (МНТЦ) #KR-1522 «Лидарные исследования Атмосферного Коричневого Облака в Центральной Азии», партнерского проекта с Агентством защиты окружающей среды США (EPA USA) #3715 «Трансконтинентальный перенос воздушного загрязнения из Центральной Азии в USA», а также работ, проводимых в рамках международного проекта «Атмосферное Коричневое Облако (ABC)» на сети

обсерваторий ABC NOAA/UNEP «Аэрозоль-Химия-Климат» в Южной Азии, в состав которой входит Лидарная Станция Теплоключенка Кыргызско-Российского Славянского университета как Кыргызская климатическая обсерватория ABC в Центральной Азии (КСО-СА).

Цель и задачи исследования. Основной целью работы является разработка региональных моделей оптических и физических характеристик аэрозоля. Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи исследования:**

- Разработать методику проведения совместной обработки лидарных и фотометрических измерений;
- Усовершенствовать метод восстановления коэффициента обратного рассеяния;
- Провести измерения оптических и физических характеристик аэрозоля, а также обработку полученных результатов;
- Выявить основные источники и провести классификацию видов переноса аэрозольного загрязнения на Центральную Азию;
- Выявить особенности пространственно-временного распределения оптических и физических характеристик аэрозоля при различных видах переноса воздушного загрязнения;
- На основе полученных экспериментальных данных разработать региональные модели оптических и физических характеристик аэрозоля и провести оценку его влияния на перенос солнечной радиации на земную поверхность при выносах на регион загрязнения из различных источников.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Впервые в центрально-азиатском регионе проведены комплексные исследования аэрозольного загрязнения, включая лидарные и наземные гравиметрические измерения частиц в диапазоне размеров до 2,5 и 10 мкм для определения массовой концентрации мелкодисперсных и крупнодисперсных частиц, а также элементного и органического углерода;
- Разработана методика совместной обработки результатов лидарных и фотометрических измерений для повышения точности восстановления характеристик аэрозоля;
- Усовершенствован метод восстановления коэффициента обратного аэрозольного рассеяния по распределению лидарного отношения;
- Выявлены основные источники и виды переноса аэрозольного загрязнения на Центральную Азию;
- На основе комплексных экспериментов, включающих в себя лидарные, фотометрические, гравиметрические и спутниковые измерения, впервые разработаны региональные модели оптических и физических характеристик тропосферного аэрозоля и проведены оценки аэрозольного радиационного воздействия при выносах ABC и пыли на регион.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

- Разработанная методика совместной обработки многоволновых лидарных и фотометрических измерений и усовершенствованный метод восстановления коэффициента обратного аэрозольного рассеяния и соответствующий пакет программ обработки используются на Лидарной станции Теплоключенка при обработке данных регулярных измерений;
- Выявленные основные источники и виды переноса аэрозольного загрязнения могут быть использованы в качестве основы для обоснования размещения наземных станций мониторинга воздушного загрязнения в Центральной Азии;
- Разработанные модели оптических и физических характеристик тропосферного аэрозоля могут применяться при прогнозировании изменений в радиационном балансе атмосферы (климатической изменчивости) и качестве воздуха региона при переносах аэрозольного загрязнения, а также для корректировки глобальных циркуляционных и региональных физико-химических моделей.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методика совместной обработки многоволновых лидарных и фотометрических измерений и усовершенствованная методика восстановления коэффициента обратного рассеяния по распределению лидарного отношения, которая позволяет расширить временные и высотные рамки лидарного зондирования, тем самым учитывать особенности вертикального распределения характеристик аэрозоля.

2. Закономерности распределения характеристик аэрозоля в приземном слое (региональные модели оптических и физических характеристик аэрозоля слоя активного турбулентного перемешивания) в зависимости от источников и видов переноса загрязнения на Центральную Азию, на основе которых проведены оценки аэрозольного радиационного воздействия в единичном столбе атмосферы.

3. Закономерности распределения характеристик аэрозоля в слоях переноса загрязнения выше приземного слоя в зависимости от типа источника (региональные модели оптических и физических характеристик аэрозоля в слоях в свободной тропосфере). Эти модели позволяют оценить влияние слоев аэрозольного загрязнения на перенос солнечной радиации с целью установления влияния на климатическую изменчивость, гидрологический цикл, здоровье людей и т.д.

Личный вклад соискателя заключается в непосредственном участии в проведении экспериментальных лидарных, фотометрических, гравиметрических измерений, обработке, систематизации и анализе полученных данных. Все основные научные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично.

Апробация результатов исследований. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры

физики и микроэлектроники КРСУ, на ежегодных научных конференциях КРСУ, на конференции молодых ученых UNEP ABC Training School (Катманду, Непал, 2008 г.), на ежегодной встрече обсерваторий международной сети ABC Южная Азия (Бангкок, Таиланд, 2010 г.), на Международной научно-практической конференции «Высокие технологии и фундаментальные исследования» (Санкт-Петербург, 2010 г.), на Международном симпозиуме по атмосферной радиации стран СНГ МСАР-2011 (Санкт-Петербург, 2011 г.), на Международной научной конференции «Рахматулинские чтения» (Бишкек, 2011 г.).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По теме диссертации опубликовано 12 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и выводов, изложенных на 156 странице машинописного текста, включая 16 таблиц, 57 рисунков и списка литературы из 141 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приводится обзор современных литературных данных, характеризующих влияние атмосферного загрязнения на перенос солнечной радиации и здоровье человека. Обоснована необходимость выявления закономерностей распределения аэрозольных характеристик в зависимости от различных источников и видов переноса, вследствие различия их эффектов в слое активного турбулентного перемешивания и в свободной тропосфере. Приведен обзор региональных моделей, разработанных в рамках проведения различных полевых кампаний, а также основные трудности применения их для нашего региона. Обоснована необходимость разработки модели оптико-физических характеристик воздушного загрязнения, отражающей особенности Центрально-Азиатского региона.

Во **второй главе** рассмотрены методики обработки лидарных, фотометрических, гравиметрических измерений, спутниковых и модельных данных, а также методика расчета аэрозольного радиационного воздействия.

Разработанная методика проведения совместных лидарных и фотометрических измерений, которая позволяет в отсутствие данных о вертикальном распределении лидарного отношения (слабый сигнал комбинационного рассеяния, дневное время суток) получить среднее значение лидарного отношения в слое атмосферы до точки калибровки и уточненный искомый профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния.

Интеграл лидарного профиля ослабления, соответствующий полученной фотометром оптической толщине, обеспечивает привязку отношения ослабления в столбе атмосферы к обратному рассеянию. Условие равенства аэрозольной оптической толщины (АОТ) (τ_a), рассчитанной по лидарным данным и измеренной солнечным фотометром (τ_ϕ), позволяет вычислять

среднее значение лидарного отношения (Рис. 1) и уточненный искомый профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния.

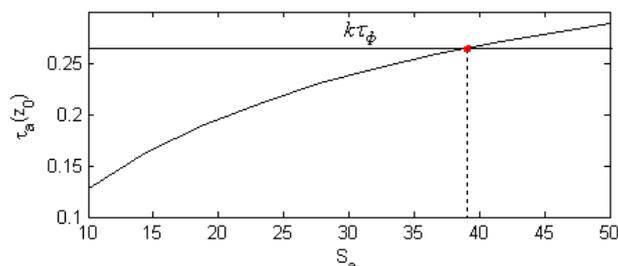


Рис. 1. Зависимость аэрозольной оптической толщины τ_a от лидарного отношения S_a и линия, соответствующая фотометрической АОТ (τ_ϕ)

Разработан также метод восстановления коэффициента обратного рассеяния с использованием модели ступенчатого распределения лидарного отношения, который не критичен ко времени проведения измерения и может успешно применяться при наличии на профилях сигнала обратного рассеяния явно выраженных участков неоднородностей в свободной тропосфере со значениями отношения рассеяния порядка $R \approx 10$ и выше (Рис. 2 и 3):

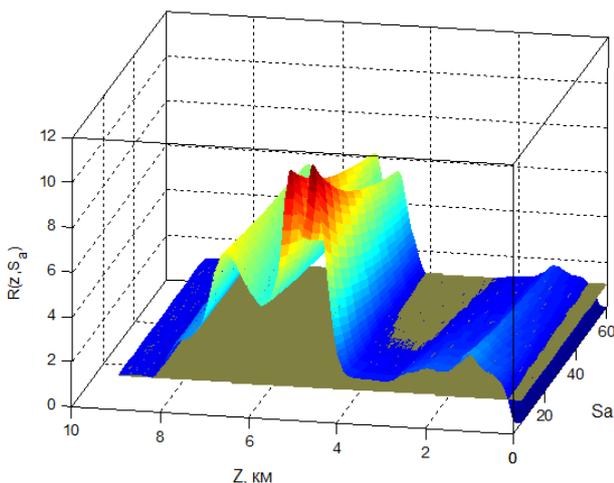


Рис. 2. Распределение отношения рассеяния в пространстве переменных $R(z, S_a)$ по данным лидарных измерений 23 марта 2009 г. на $\lambda=532$ нм

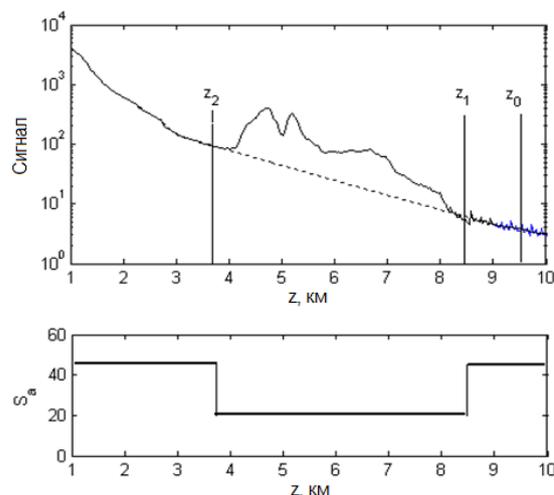


Рис. 3. Схема ступенчатого распределения лидарного отношения (сигнал по лидарным данным от 23 марта 2009 г. на $\lambda=532$ нм)

При обработке результатов фотометрических измерений с помощью мультиполосного солнечного фотометра Microtops II Sunphotometer проводилась аппроксимация спектральной зависимости аэрозольной оптической толщины полиномом первого и второго порядка, что дает возможность получать дополнительную информацию об аэрозоле, а именно:

Средний по всем длинам волн параметр Ангстрема позволяет получить информацию о размерах частиц. В частности, дает возможность различать мелкодисперсный аэрозоль (сажа, сульфаты, нитраты) от крупнодисперсного (пыль, био-аэрозоль).

С помощью коэффициента замутнения атмосферы по Ангстрему можно оценивать аэрозольную нагрузку, выделяя случаи сильного замутнения атмосферы (мощные пылевые бури, масштабные пожары биомассы и т.д.).

Аппроксимация же спектральной зависимости аэрозольной оптической толщины полиномом второго порядка позволяет охарактеризовать распределение аэрозоля по размерам как одномодальное (монодисперсный крупный или мелкий аэрозоль) или бимодальное (полидисперсный смешанный аэрозоль). В частности, оценка кривизны этой зависимости говорит об относительном влиянии аккумуляционной (мелкодисперсной) моды по сравнению с частицами крупной фракции на оптические свойства частиц.

При исследовании радиационных эффектов аэрозоля использована модифицированная методика расчета аэрозольного радиационного воздействия на верхней границе, в толще атмосферы и на подстилающей поверхности с учетом сезонной и широтной изменчивости потоков солнечной радиации, разработанная для южно-азиатской сети обсерваторий ABC UNEP/NOAA и прошедшая валидацию на точках сети.

В третьей главе представлены закономерности распределения оптических и физических характеристик аэрозоля слоя активного турбулентного перемешивания по результатам комплексного эксперимента в регионе Центральной Азии в период 2008-2010 гг.

На основе анализа обратных траекторий HYSPLIT, модели пространственного распределения аэрозольной оптической толщины NAAPS, а также спутниковых данных установлено, что в регион осуществляются преимущественно региональный и дальний переносы загрязнения из пустынь Такла-Макан (S1), Ближнего востока (Южно-Азиатским антициклоном) (S2) и бассейна Аральского моря (S3) в виде пылевого аэрозоля, а также трансграничный перенос мелкодисперсного аэрозоля в виде смеси сульфатов и сажи с территории России и Казахстана (S4) (Рис. 4).



Рис. 4. Основные источники загрязнения воздушных масс, относящиеся к географическим областям-очагам их формирования

Выделены три основных типа аэрозоля: крупнодисперсный (минеральная пыль), мелкодисперсный (сульфатные, нитратные и сажевые частицы) и смешанный (смесь пыли и антропогенного аэрозоля).

Выявлены сезонные вариации основных составляющих массовой концентрации PM2.5 аэрозольного загрязнения по результатам расчета по модели STEM (проф. G. Carmichael, Университет Iowa, США) (рис.5). В расчетах использованы данные химического анализа проб воздуха, взятых на Лидарной станции Теплоключенка (проф. J Schauer, Университет Wisconsin, США).

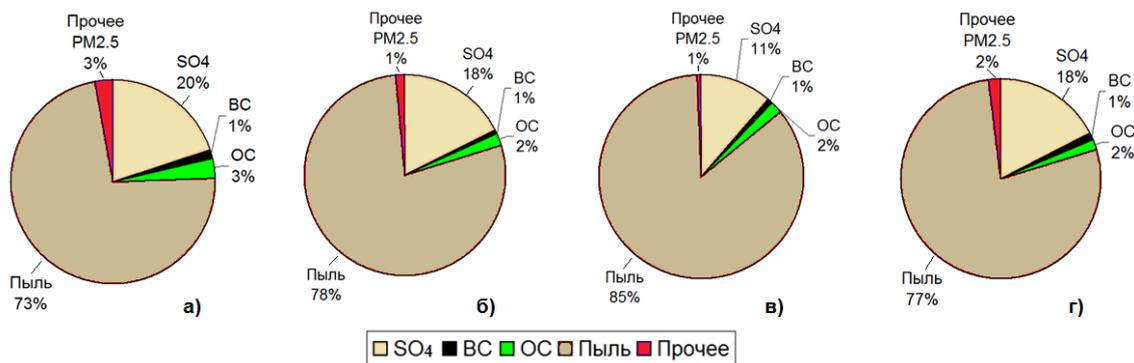


Рис. 5. Сезонные вариации основных составляющих PM2.5 на ЛСТ КРСУ, а) зима, б) весна, в) лето, г) осень

Установлено, что во все сезоны наблюдается преобладание пылевого аэрозоля (73-85 %) с максимальными значениями, приходящимися на летний сезон в период пылевых бурь с пустыни Такла-Макан (рис. 5в). Наименьшее содержание пылевых частиц наблюдается в зимнее время (73 %), когда активность пыльных бурь падает и возрастает эмиссия сульфатных частиц (с 11 до 20%) за счет трансграничного переноса антропогенного загрязнения с территории России и Казахстана (рис. 5а). Содержание черного углерода во все сезоны не превышало 1 %.

На рис.6, для сравнения, приведены среднегодовые вариации основных составляющих массовой концентрации PM2.5 на ЛСТ КРСУ и двух других обсерваториях сети ABC – Южная Азия: Waligoan (Северном Китай) и Hanimadhoo (Мальдивы).

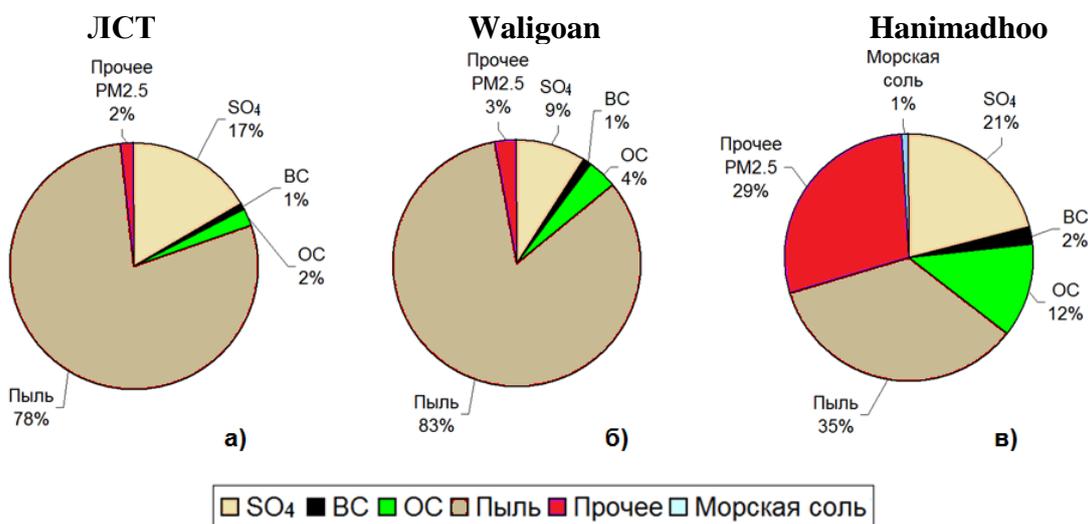


Рис. 6. Среднегодовые вариации основных составляющих PM2.5 в обсерваториях сети ABC - Южная Азия: ЛСТ (а), Waligoan (б) и Hanimadhoo (в)

(антропогенный аэрозоль) и крупных частиц, преимущественно минерального пылевого происхождения. Величина АОТ меняется от 0,08 (зимой) до 0,71 в весенний период. При этом более низкие значения параметра Ангстрема ($0,155 \pm 0,100$), по сравнению с трансграничным переносом, свидетельствуют о наличии крупнодисперсных частиц.

▪ При региональном переносе, как и в случае Азиатской пыли, наблюдается превалирование крупнодисперсных пылевых частиц (низкий уровень отношения массового коэффициента $PM_{2,5}/PM_{10} < 0,42$). Средняя аэрозольная оптическая толщина равна $0,254 \pm 0,057$, среднее значение параметра Ангстрема - $0,332 \pm 0,107$. Для этого типа переноса характерно большее процентное содержание неорганического аэрозоля по сравнению с органическим и элементным углеродом.

На основе выявленных закономерностей по результатам эксперимента впервые для региона разработаны модели основных оптико-физических характеристик аэрозоля слоя активного турбулентного перемешивания (АТП) (табл. 1 и рис.8), на основе которых проведены оценки аэрозольных радиационных эффектов.

Таблица 1а – Оптико-физические характеристики аэрозоля в слое активного турбулентного перемешивания

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>	<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Верх. граница H_{PBL}, км	2.7 ± 0.2	$PM_{2,5}/PM_{10}$, %	44.3 ± 2.8
$IB_{532} \cdot 10^{-3}$, $ср^{-1}$	2.19 ± 0.33	SSA_{500}	0.957 ± 0.011
DRmax	0.08 ± 0.004	V_f/V_c	$0,1 \div 0,3$
LR, $ср$	33 ± 3	r_f, $МКМ$	$0,08 \div 0,11$
AO_{532}	0.07 ± 0.01	σ_f	$1,6 \div 1,7$
AO_{500}	0.28 ± 0.05	r_c, $МКМ$	$3,0 \div 3,5$
$A_{380/870}$	0.20 ± 0.09	σ_c	$1,3 \div 1,6$
α, $км^{-1}$	0.033 ± 0.003	n	$1,45 \div 1,55$
PM_{10}, $мкг/м^3$	30.1 ± 4.4	k	$0,006 \div 0.04$

Обозначения:

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

DRmax – максимальное деполаризационное отношение в слое на длине волны 532 нм;

LR – лидарное отношение в слое на $\lambda=532$ нм;

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

AO_{500} – аэрозольная оптическая толщина на $\lambda=500$ нм;

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

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

PM_{10} – массовая концентрация PM_{10} ;

$PM_{2,5}/PM_{10}$ – отношение массовых концентрации – массовый коэффициент;

SSA_{500} – альbedo однократного рассеяния на $\lambda=500$ нм;

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

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 $\lambda=532$ нм.

Зависимость аэрозольной оптической толщины от длины волны:

$$AO_{\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1)$$

Таблица 1б – Коэффициенты α и β в (1).

	Сезоны				При наличии	
	Зима	Весна	Лето	Осень	АВС	Пыль
β	218.910±31.232	4.970±0.742	129.424±17.873	813.873±146.706	3.468±0.525	2.158±0.396
α	1.206±0.0740	0.547±0.069	1.050±0.068	1.403±0.065	1.381±0.055	0.202±0.030

На рис. 8а представлены зависимости АОТ от длины волны по сезонам года, в АВС (атмосферных коричневых облаках) и пыли. Наклон зависимостей - есть параметр Ангстрема (α), характеризующий доминирующую фракцию в распределении частиц по размерам, так например, чем выше его численное значение, тем больше вклад мелкодисперсного аэрозоля и наоборот, чем ниже его значение, тем крупнее размеры частиц.

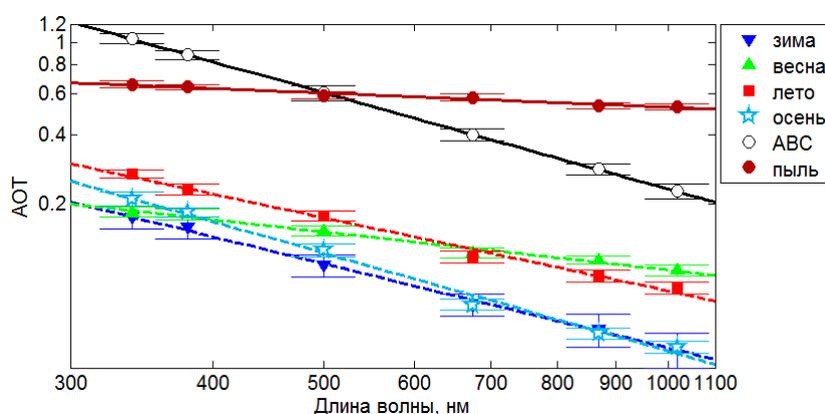


Рис. 8а. Зависимость АОТ от длины волны по сезонам, в АВС и пыли

Так, например, во все сезоны преобладают мелкодисперсные частицы, кроме весны, когда осуществляется в основном вынос крупнодисперсных частиц. Максимальные значения параметра Ангстрема ~ 1.4 наблюдаются при выносах АВС, за счет наличия мелкодисперсных сажевых частиц, тогда как, минимальные значения ~ 0.2 , зарегистрированы при выносах пыли, которая в основном представлена крупнодисперсной минеральной компонентой.

Зависимость альбедо однократного рассеяния аэрозольных частиц от длины волны:

$$SSA = k_0 \lambda^{-k_1} \quad (2)$$

Таблица 1в – Значения коэффициентов k_0 и k_1 в (2)

	Сезоны				При наличии	
	Зима	Весна	Лето	Осень	АВС	Пыли
k_0	1.596±0.086	0.662±0.060	2.406±0.246	1.538±0.121	2.528±0.312	0.717±0.046
k_1	0.082±0.008	-0.054±0.0140	0.159±0.015	0.078±0.013	0.198±0.017	-0.045±0.010

На рис. 8б представлены зависимости альбедо однократного рассеяния по сезонам года, в АВС и пыли, и результат аппроксимации выражением (2).

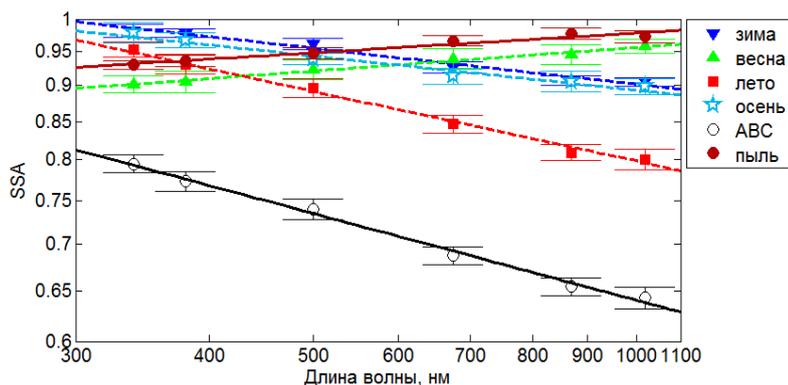


Рис. 8б. Зависимость альbedo однократного рассеяния от длины волны

Видно, что для случаев с доминированием крупнодисперсных частиц (весенний период, выносы пыли) зависимость альbedo однократного рассеяния от длины волны заметно отличается от случаев с мелкодисперсным аэрозолем. При этом наименьшие значения альbedo однократного рассеяния наблюдаются для случаев выноса сильно-поглощающих частиц в виде сажи в составе ABC.

Зависимость асимметрии индикатрисы рассеяния аэрозольных частиц от длины волны:

$$g = m_0 \lambda^{-m_1} \quad (3)$$

Таблица 1в – Значения коэффициентов m_0 и m_1 в (3).

	Сезоны				При наличии	
	Зима	Весна	Лето	Осень	ABC	Пыли
m_0	3.725 ± 0.195	1.327 ± 0.234	0.709 ± 0.079	0.855 ± 0.091	1.573 ± 0.164	0.992 ± 0.065
m_1	0.273 ± 0.009	0.095 ± 0.026	0.003 ± 0.017	0.045 ± 0.017	0.146 ± 0.016	0.041 ± 0.010

На рис.8в представлены зависимости параметра асимметрии по сезонам года, в ABC и пыли, описываемые выражением (3).

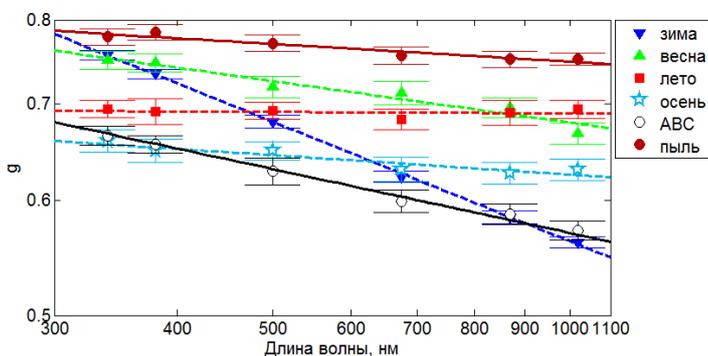


Рис. 8в. Зависимость параметра асимметрии от длины волны

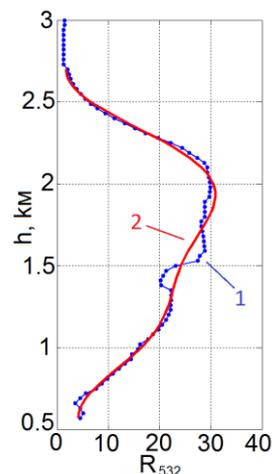


Рис. 8г. Распределение отношения рассеяния в слое АТП: 1- по данным лидара, 2- по модели (4)

Видно, что наибольшие значения параметра асимметрии наблюдаются в случае крупнодисперсного аэрозоля (пыль), тогда как наименьшие характерны для мелкодисперсного (сажевые и сульфатные частицы).

Вертикальное распределение отношения рассеяния на длине волны 532 нм (R_{532}) в слое АТП (рис. 8г) описывается выражением:

$$R = C_1 \cdot \sin(C_2 h + C_3) + C_4 \cdot \sin(C_5 h + C_6) + C_7 \quad (4)$$

где $C_1 \dots C_7$ равны 12.3218, 3.1680, -3.8485, 5.0213, 5.6455, -4.1430, 19.1755.

Функция распределения частиц по размерам в слое АТП имеет бимодальный вид:

$$\frac{dV}{d \ln r} = \frac{C_f}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_f} \exp\left(-\frac{[\ln r - \ln r_f]^2}{2(\ln \sigma_f)^2}\right) + \frac{C_c}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_c} \exp\left(-\frac{[\ln r - \ln r_c]^2}{2(\ln \sigma_c)^2}\right) \quad (5)$$

где, индексы f и c, обозначают мелкодисперсную и крупнодисперсную моды. При этом в распределении частиц по размерам в слое АТП (рис. 8д) доминирует крупнодисперсная фракция, в основном в виде пылевого аэрозоля.

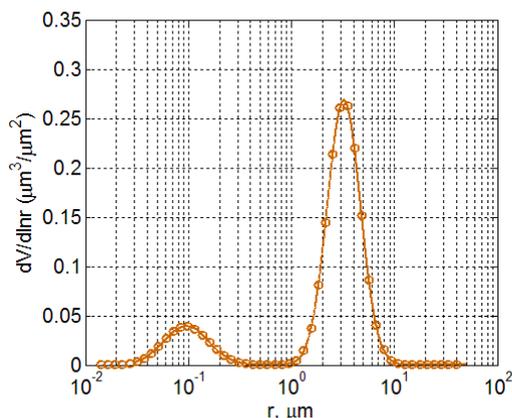


Рис. 8д. Распределение частиц по размерам в слое АТП

На основе разработанных моделей оптических и микрофизических характеристик аэрозольного загрязнения проведены оценки его влияния на перенос солнечной радиации на верхней границе атмосферы (ВГА), в толще атмосферы (АТМ) и на подстилающей поверхности (ПП) по эмпирическим зависимостям:

$$ARF_{ВГА} = \beta_{ВГА} \tau_{a(675)}, \quad ARF_{ПП} = \beta_{ПП} \tau_{a(675)}, \quad ARF_{АТМ} = \beta_{АТМ} \tau_{a(675)} \quad (6)$$

Значения коэффициентов $\beta_{ВГА}$, $\beta_{ПП}$ и $\beta_{АТМ}$ в (6) приведены в табл. 1г.

Таблица 1г – Коэффициенты $\beta_{ВГА}$, $\beta_{ПП}$ и $\beta_{АТМ}$

	$\beta_{ВГА}$	$\beta_{ПП}$	$\beta_{АТМ}$
Зима	26,11±1,96	75,59±3,12	49,48±5,08
Весна	20,95±3,52	60,67±5,72	39,72±9,24
Лето	07,02±2,42	94,42±4,77	87,7±7,19
Осень	23,10±2,90	78,93±4,51	55,83±7,41
При наличии:			
АВС	14,57±2,62	158,85±3,44	144,28±6,06
Пыли	22,08±1,98	46,03±3,36	23,95±5,34

При этом установлено:

– Максимальный аэрозольный радиационный эффект наблюдается в теплое полугодие (-26 Вт/м^2 на подстилающей поверхности и $+18 \text{ Вт/м}^2$ в толще атмосферы) в периоды активизации пыльных бурь и выносов антропогенного аэрозоля сжигания биомассы.

– При наличии пыли в атмосфере наблюдается положительный радиационный эффект, равный $+59 \text{ Вт/м}^2$, что может приводить к нагреву самой атмосферы и охлаждению подстилающей поверхности за счет дефицита солнечной радиации (-85 Вт/м^2).

– Наибольший радиационный эффект аэрозоля в атмосфере ($+125 \text{ Вт/м}^2$) достигается при наличии АВС и превышает радиационный эффект от присутствия пыли в 2 раза, что связано с присутствием антропогенных частиц с сильным поглощением (низким значением альbedo однократного рассеяния).

В четвертой главе установлены закономерности распределения оптических и физических характеристик аэрозоля в слоях загрязнения в свободной тропосфере:

▪ Распределения частиц по размерам в слоях переноса загрязнения подчиняются логнормальному закону с двумя модами: в области крупнодисперсной пылевой фракции и в области тонкодисперсных частиц. Самым малым размером частиц обладает региональный антропогенный аэрозоль (средний модальный радиус $0,12 \text{ мкм}$). Самые крупные частицы переносятся с пустынь Ближнего Востока и Такла-Макан с модальными радиусами 3 и $2,7 \text{ мкм}$, соответственно.

▪ Региональные источники характеризуются выносами загрязнения с максимальными значениями аэрозольной нагрузки, оптического ослабления и минимальным содержанием мелкодисперсной фракции. Верхняя граница слоев переноса самая низкая (около $4,8 \text{ км}$), по сравнению с другими источниками, вследствие выноса в основном тяжелых пылевых частиц. Для регионального аэрозоля характерны минимальные значения альbedo однократного рассеяния ($0,95$) и максимальные значения мнимой части комплексного показателя преломления ($0,021$) по сравнению с аэрозолем дальнего и трансграничного переноса.

▪ При трансграничном переносе в холодный период эмиссия пыли низкая и в переносимой воздушной массе преобладают частицы мелкодисперсной фракции, для которых характерны низкие значения интегрального коэффициента обратного рассеяния ($0,009$) и высокие значения параметра Ангстрема (около $0,51$), массового коэффициента (64%). При переходе с холодного на теплый период возрастает активность пылевых бурь и доминирование крупнодисперсных частиц.

▪ При дальнем и трансграничном переносах наблюдается сезонная изменчивость в поглощательных способностях аэрозольных частиц - в холодный период эмиссия пыли низка (уменьшение поглощательной способности) и увеличиваются выбросы сульфатного и нитратного аэрозоля (увеличение рассеивающей способности).

Выявленные закономерности распределения характеристик аэрозольного загрязнения позволили в итоге построить региональные модели в слоях выше слоя АТП при различных видах переноса загрязнения в регион (табл. 2, рис. 9).

Таблица 2а – Оптико-физические характеристики аэрозоля в свободной тропосфере при различных видах переноса загрязнения в регион

Параметр	Региональный (Такла-Макан)	Региональный (Фергана)	Дальний	Трансграничный
Ниж. высота слоя, км	2.7 ± 0.3	4.1 ± 1.1	4.6 ± 0.4	5.0 ± 0.6
Верх. высота слоя, км	4.8 ± 0.7	5.1 ± 0.9	8.2 ± 0.5	7.1 ± 0.4
Dh, км	2.1 ± 0.5	1.1 ± 0.2	3.6 ± 0.5	2.1 ± 0.4
$IV_{532} \cdot 10^{-3}, \text{cp}^{-1}$	0.0238 ± 0.0070	0.0008 ± 0.0001	0.0156 ± 0.0063	0.0099 ± 0.0039
DRmax	0.09 ± 0.01	0.07 ± 0.01	0.11 ± 0.00	0.10 ± 0.01
LR, cp	17.57 ± 3.15	34.50 ± 3.50	13.67 ± 3.77	16.29 ± 1.60
AOD ₅₃₂	0.31 ± 0.06	0.03 ± 0.01	0.12 ± 0.04	0.13 ± 0.03
AOD ₅₀₀	0.37 ± 0.09	0.26 ± 0.06	0.20 ± 0.04	0.20 ± 0.04
A _{380/870}	0.06 ± 0.05	1.30 ± 0.07	0.25 ± 0.17	0.51 ± 0.10
$\alpha, \text{км}^{-1}$	0,157 ± 0,034	0.025 ± 0.003	0.048 ± 0.024	0.073 ± 0.021
PM ₁₀ , мкг/м ³	35.7 ± 5.7	11.9 ± 1.4	20.9 ± 5.0	8.7 ± 1.5
PM _{2.5} /PM ₁₀ , %	42.1 ± 2.7	56.9 ± 0.9	45.2 ± 1.5	64.2 ± 2.7
SSA ₅₀₀	0.951 ± 0.005	0.994 ± 0.007	0.971 ± 0.016	0.995 ± 0.003
V _p /V _c	0.62 ± 0.14	2.80 ± 2.20	1.55 ± 0.26	2.05 ± 0.49
r _f , мкм	0.36 ± 0.08	0.12 ± 0.00	0.22 ± 0.06	0.19 ± 0.05
σ_f	1.41 ± 0.09	1.65 ± 0.45	2.13 ± 0.58	2.06 ± 0.30
r _c , мкм	2.68 ± 0.51	1.10 ± 0.60	3.07 ± 0.35	3.00 ± 0.52
σ_c	2.38 ± 0.40	1.70 ± 0.30	2.20 ± 0.37	1.78 ± 0.17
n	1.54 ± 0.04	1.51 ± 0.07	1.52 ± 0.04	1.46 ± 0.03
k	0.021 ± 0.008	0.003 ± 0.002	0.015 ± 0.009	0.012 ± 0.008

Обозначения те же, что и в табл. 1а.

Вертикальные распределения отношения рассеяния на длине волны 532 нм в слоях загрязнения в свободной тропосфере приведены на рис. 9а.

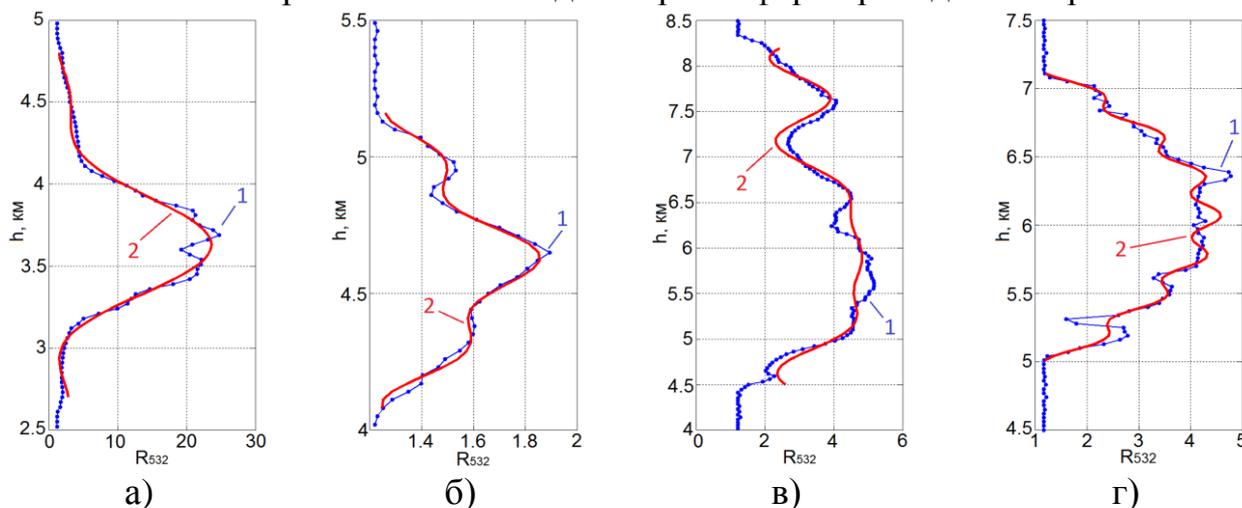


Рис. 9а. Высотное распределение отношения рассеяния на 532 нм в свободной тропосфере при переносе загрязнения из: а) пустыни Такла-Макан, б) Ферганской долины, при в) дальнем, г) трансграничном переносах загрязнения (кривая 1 – по данным лидара, 2 – по модели)

При региональном переносе аэрозоля из пустыни Такла-Макан, высотное распределение R_{532} описывается эмпирической зависимостью:

$$R = C_1 \cdot \sin(C_2 h + C_3) + C_4 \cdot \sin(C_5 h + C_6) + C_7 \quad (7)$$

где C_1, \dots, C_7 равны -10.3656, 3.3030, 5.2236, 3.6521, -6.6207, 19.2246, 9.6565.

При региональном переносе из Ферганской долины:

$$R = C_1 \cdot \sin(C_2 h + C_3) + C_4 \cdot \sin(C_5 h + C_6) + C_7 \quad (8)$$

где C_1, \dots, C_7 равны 0.0819, 18.5791, -59.5843, -0.1840, 7.65746, -11.7062, 1.6051.

При дальнем переносе загрязнения:

$$R = C_1 \cdot \sin(C_2 h + C_3) + C_4 \cdot \sin(C_5 h + C_6) + C_7 \cdot \sin(C_8 h + C_9) + C_{10} \quad (9)$$

где C_1, \dots, C_{10} равны 1.0398, 1.9239, 9.1448, -6.7905, 6.4071, 10.8914, 6.8816, 6.3189, -57.7007, 3.8704.

При трансграничном переносе загрязнения:

$$R = C_1 \cdot \sin(C_2 h + C_3) + C_4 \cdot \sin(C_5 h + C_6) + C_7 \quad (10)$$

где C_1, \dots, C_7 равны -3.1136, 1.5188, 14.3576, 0.2758, 20.8551, 0.6545, 1.6623.

Параметры, характеризующие микрофизические свойства аэрозольных частиц в распределении частиц по размерам (5) для случая аэрозоля свободной тропосферы (рис. 9б) приведены в табл. 2б.

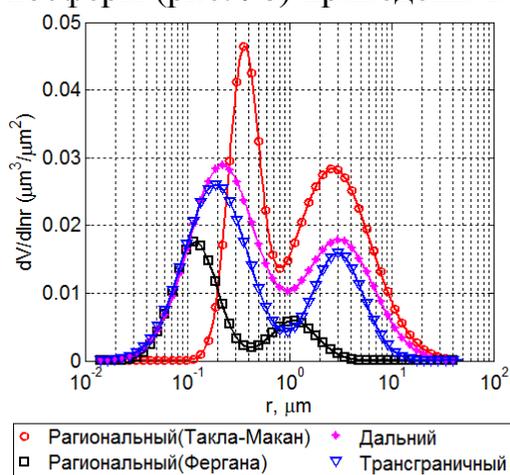


Рис. 9б. Распределение частиц по размерам в свободной тропосфере для различных видов переноса

Таблица 2б – Параметры логнормального распределения частиц по размерам в слоях свободной тропосферы при различных видах переноса

Вид переноса	Γ_f , мкм	σ_f	Γ_c , мкм	σ_c
Региональный (Такла-Макан)	0.36 ± 0.08	1.41 ± 0.09	2.68 ± 0.51	2.38 ± 0.40
Региональный (Фергана)	0.12 ± 0.00	1.65 ± 0.45	1.10 ± 0.60	1.70 ± 0.30
Дальний	0.22 ± 0.06	2.13 ± 0.58	3.07 ± 0.35	2.20 ± 0.37
Трансграничный	0.19 ± 0.05	2.06 ± 0.30	3.00 ± 0.52	1.78 ± 0.17

Разработанные региональные модели оптико-физических характеристик аэрозольного загрязнения при различных видах переноса в свободной тропосфере позволили впервые оценить вклад аэрозольных слоев на перенос солнечной радиации.

На рис. 10 представлены расчеты аэрозольного радиационного воздействия на верхней границе атмосферы (ВГА), в толще атмосферы (АТМ), на подстилающей поверхности (ПП) и в самих слоях переноса загрязнения – на

верхней границе слоя (ВГС), в самом слое атмосферы (СА) и на нижней границе слоя (НГС) при различных видах переноса.

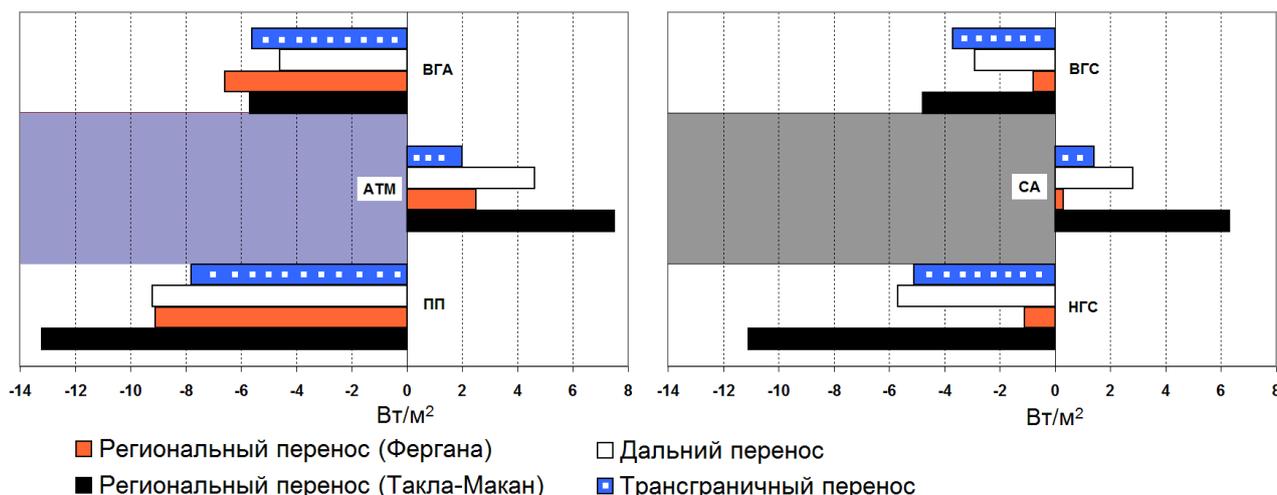


Рис. 10. Аэрозольное радиационное воздействие ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в толще атмосферы и в слоях переноса загрязнения при различных видах переноса.

На основе оценки аэрозольного радиационного воздействия слоев загрязнения установлено:

- Наибольшее радиационный эффект наблюдается при региональном выносе пыли с пустыни Такла-Макан, где основная часть воздействия приходится непосредственно на сам слой загрязнения ($6,3 \text{ Вт}/\text{м}^2$), формируя нагрев атмосферы в пределах этого слоя и охлаждение на подстилающей поверхности. При этом на слой пылевого аэрозоля приходится 84% общего форсинга, как всего столба атмосферы, так и верхней границы, и подстилающей поверхности;

- При дальнем переносе пылевого аэрозоля в теплое полугодие вклад слоя в радиационное воздействие составляет порядка 63%;

- В холодный период при дальнем и трансграничном переносах смешанного аэрозоля вклад слоя загрязнения в радиационный эффект достигает 64% радиационного воздействия всей атмосферы и 70% ARF верхней границы;

- При региональном переносе антропогенного загрязнения с Ферганской долины отмечается наименьший вклад слоя загрязнения в радиационный эффект (всего 12%) из-за большой величины альbedo однократного рассеяния (0,99) и малой АОТ (0.03).

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика совместной обработки многоволновых лидарных и фотометрических измерений. Методика позволяет в отсутствии данных о вертикальном распределении лидарного отношения (слабый сигнал комбинационного рассеяния, дневное время суток) получить среднее значение лидарного отношения в слое атмосферы до точки калибровки и уточненный искомый профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния.

2. Разработан метод восстановления коэффициента обратного рассеяния с использованием модели ступенчатого распределения лидарного отношения,

который не критичен ко времени проведения измерения и может успешно применяться при наличии на профилях сигнала обратного рассеяния явно выраженных участков неоднородностей в свободной тропосфере.

3. Выявлены основные источники аэрозольного загрязнения и проведена классификация его видов переноса на регион.

4. Разработаны модели основных оптико-физических характеристик аэрозольного загрязнения слоя активного турбулентного перемешивания, на основе которых проведены оценки аэрозольных радиационных эффектов в столбе атмосферы.

5. На основе лидарных измерений вертикальных профилей оптических и микрофизических характеристик аэрозоля выявлены основные закономерности их распределения в слоях переноса загрязнения выше слоя активного турбулентного перемешивания из различных источников.

6. Разработаны модели оптико-физических характеристик слоев загрязнения в свободной тропосфере при различных видах переноса, на основе которых проведены оценки их влияния на перенос солнечной радиации на земную поверхность, что позволит снизить неопределенности в оценках радиационных эффектов, чувствительных к вертикальному распределению аэрозоля.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Imashev S.** About periodicity in the laser backscattering signal from aerosol structures / В. Chen, S. Imashev, P. Kozlov // Proceedings of International Workshop ISTC “Baikal-2006”. – Tomsk, 2006. – P. 60-63.

2. **Имашев С.А.** Оценка параметра Херста по наклону энергетического спектра на основе вейвлет-преобразования / Б.Б. Чен, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. – 2007. – Т. 7, № 8. – С. 64-74.

3. **Имашев С.А.** Динамика частиц аккумуляционной моды при трансграничных переносах аэрозоля / Б.Б. Чен, Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. – 2009. – Т. 9, № 11. – С. 73-85.

4. **Имашев С.А.** Оптически и физические свойства аэрозоля при дальних переносах загрязнения на Центральный Тянь-Шань [Текст] / Б.Б. Чен, С.А. Имашев, Л.Г. Свердлик // Труды 10-й Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» – Санкт-Петербург, 09-11 декабря, 2010: СПбГПУ. – С. 387-393

5. **Imashev S.A.** Characteristics of fine particle carbonaceous aerosol at two remote sites in Central Asia [Text] / J.P. Miller-Schulze, M.M. Shafer, J.J. Schauer, P.A. Solomon, J. Lantz, M. Artamonova, B.B. Chen, S.A. Imashev, L.G. Sverdlik, G.R. Carmichael, J.T. Deminter // Atmospheric Environment. – 2011. – Vol. 45. – P. 6955-6964.

6. **Имашев С.А.** Вариации озона при переносах загрязнения [Текст] / С.А. Имашев, Л.Г. Свердлик, Б.Б. Чен // Труды международной научной

конференции «Рахматулинские чтения». – Бишкек, 26-27 мая, 2011. – С. 346-351.

7. **Имашев С.А.** Оптико-физические свойства аэрозоля при переносах загрязнения на Центральную Азию [Текст] / С.А. Имашев, Л.Г. Свердлик, Б.Б. Чен, Э.Ю. Зыскова // Труды международной научной конференции «Рахматулинские чтения». – Бишкек, 26-27 мая, 2011. – С. 352-357.

8. **Имашев С.А.** Закономерности распределения оптических и физических характеристик аэрозоля по результатам многоволнового лазерного зондирования [Текст] / Б.Б. Чен, Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11, № 7. – С. 134-140.

9. **Имашев С.А.** Методы обработки лидарных сигналов обратного упругого рассеяния [Текст] / С.А. Имашев, П.В. Козлов, Л.Г. Свердлик, Б.Б. Чен // Вестник КРСУ. – 2011. – Т. 11, № 7. – С. 157-164.

10. **Имашев С.А.** Использование спутниковых данных в задачах обнаружения источников воздушного загрязнения [Текст] / С. А. Имашев // Наука и Новые технологии. – 2012. – № 1. – С. 3-5.

11. **Имашев С.А.** К методике обработки результатов фотометрических измерений [Текст] / С. А. Имашев // Физика. – 2012. – № 1. – С. 68-73.

12. **Имашев С.А.** Методика расчета параметра Ангстрема и коэффициента замутнения атмосферы по результатам фотометрических измерений [Текст] / С. А. Имашев // Вестник КРСУ. – 2012. – Т. 12, № 4. – С. 175-178.

Имашев Санжар Абылбековичтин 25.00.29 – атмосферанын жана гидросферанын физикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин талапкери илимий даражасын алуу үчүн «Тропосфералык булганычтын регионалдык оптикалык жана физикалык модели» темасына жазган диссертациясынын

РЕЗЮМЕСИ

Негизги сөздөр: тропосфералык булганыч, атмосфералык кыймыл, аэрозолдук радиациялык таасир, аэрозолдун моделдери, булганычтын булактары, лидардык зондирлөө.

Изилдөө объектиси: Регионалдык булактарынан гана эмес, атмосфералык кыймыл аркылуу башка региондордон келген ар кандай булганычтын таасири астындагы Борбордук Тянь-Шань жана жалпы Борбордук Азия регионунун атмосферасынын аэрозолдук булганычы.

Изилдөө максаты: Аэрозолдун оптикалык жана физикалык мүнөздөмөлөрүнүн регионалдык моделин иштеп чыгуу.

Изилдөө ыкмалары: Лидардык зондирлөөнүн, фотометриялык, гравиметриялык жана спутник өлчөөлөрүнүн эксперименталдык, жана ошондой эле химиялык жана моделдөө маалыматтарынын комплекстүү анализи.

Алынган жыйынтыктар жана илимий жанылыгы: Алгач Борбордук Азия регионунда аэрозолдук булганычтын комплекстүү изилдөөлөрү өткөрүлдү, анын ичинде лидардык өлчөөлөр жана майда жана күпүлү дисперстүү бөлүкчөлөрдү, жана ошондой эле элементтик жана органикалык көмүртектин массалык концентрациясынын жер үстүндөгү гравиметриялык өлчөөлөрү өткөрүлдү. Аэрозолдук булганычтын негизги булактары жана анын Борбордук Азияга алып келуу агымдарынын түрлөрү аныкталды. Алгач тропосфералык булганычтын регионалдык оптикалык жана физикалык моделдери иштеп чыгарылды жана регионго ар кандай булактардан алып келинген булганыч учурунда аэрозолдук радиациялык таасири бааланды.

Колдонуу тармагы: Булганычтын булактарынын жана алып келүү агымдарынын түрлөрүнөн коз каранды аэрозолдук радиациялык таасиринин баасы, аэрозолдук булганычтын катмарларынын атмосферанын радиациялык балансынын бузулушуна болгон салымын баалоодо керектүү, бул болсо түздөн түз климаттык өзгөрүүлөргө, гидрологиялык циклге, айыл чарбага таасир этет. Аныкталган аэрозолдук булганычтын негизги булактары жана алып келүү агымдарынын түрлөрү, Борбордук Азияда аба булганычына мониторинг жүргүзүү станцияларын жайгаштыруу үчүн негиз катары колдонулушу мүмкүн. Изилдөөнүн натыйжалары Борбордук Азияда абанын сапатын жана аба булганычынын адамдын ден-соолугуна болгон терс таасиринин деңгээлин баалоо менен байланыштуу болгон маселелерди чечүүдө колдонулушу мүмкүн.

РЕЗЮМЕ

диссертации **Имашева Санжара Абылбековича** на тему: «Региональная оптическая и физическая модель тропосферного загрязнения» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Ключевые слова: тропосферное загрязнение, атмосферный перенос, аэрозольное радиационное воздействие, модели аэрозоля, источники загрязнения, лидарное зондирование.

Объект исследования: Аэрозольное загрязнение атмосферы над Центральным Тянь-Шанем и Центрально-Азиатским регионом в целом, которая находится под воздействием различных источников загрязнения, как регионального характера, так и выносимого из других регионов за счет атмосферного переноса.

Цель работы: Разработка региональных моделей оптических и физических характеристик аэрозоля.

Методы исследования: Комплексный анализ экспериментальных данных лидарного зондирования атмосферы, фотометрических, гравиметрических и спутниковых измерений, а также данных химического анализа и моделирования.

Полученные результаты и их новизна: Впервые в центрально-азиатском регионе проведены комплексные исследования аэрозольного загрязнения, включая лидарные и наземные гравиметрические измерения массовой концентрации мелкодисперсных и крупнодисперсных частиц, а также элементного и органического углерода. Выявлены основные источники и виды переноса аэрозольного загрязнения на Центральную Азию. Впервые разработаны региональные модели оптических и физических характеристик тропосферного аэрозоля и проведены оценки аэрозольного радиационного воздействия при выносах на регион загрязнения из различных источников.

Область применения: Результаты оценки аэрозольного радиационного воздействия в зависимости от источников загрязнения и видов их переноса необходимы при оценке вклада слоев аэрозольного загрязнения в нарушение радиационного баланса атмосферы, что напрямую влияет на климатическую изменчивость, гидрологический цикл, сельское хозяйство. Выявленные основные источники и виды переноса аэрозольного загрязнения могут быть использованы в качестве основы для обоснования размещения наземных станций мониторинга воздушного загрязнения в Центральной Азии. Результаты исследования могут быть использованы при решении задач, связанных с оценкой качества воздуха в Центрально-Азиатском регионе и степени негативного влияния воздушного загрязнения на здоровье человека согласно существующим международным и национальным нормам.

THE SUMMARY

Imashev Sanjar Abylbekovich

“Regional optical and physical model of tropospheric pollution”

Dissertation on obtaining of scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences on specialty 25.00.29 – physics of atmosphere and hydrosphere.

Keywords: tropospheric pollution, atmospheric transport, aerosol radiative forcing, aerosol models, pollution sources, lidar sensing.

Object of the study: Aerosol pollution of atmosphere over Central Tien-Shan and Central Asia region as a whole, which is influenced by various pollution sources, both regional and emitted from other regions due to atmospheric transport.

The **purpose of study:** Developing of regional models of optical and physical characteristics of aerosol.

Research methods: Complex analysis of experimental data of lidar sensing of atmosphere, photometric, gravimetric and satellite measurements, and also data of chemical analysis and modelling.

The **obtained results and their novelty:** For the first time complex researches of aerosol pollution are conducted in the Central Asia region, including lidar and ground-based gravimetric measurements of mass concentration of fine and coarse particles, and also elemental and organic carbon. The main sources and types of transport of aerosol pollution to the Central Asia are revealed. For the first time regional models of optical and physical characteristics of tropospheric aerosol are developed and estimations of aerosol radiative forcing are carried out at pollution transport to the region from various sources.

Field of application: Results of estimation of aerosol radiative forcing on sources of pollution and types of its transport over are necessary at estimation of contribution of aerosol pollution layers in disturbance of radiative balance of atmosphere that directly influences climatic variability, hydrological cycle, agriculture. The revealed main sources and types of aerosol pollution transport can be used as a basis for a deployment of ground-based stations of air pollution monitoring in the Central Asia. Results of research can be used at solution of issues connected with estimation of air quality in the Central Asia region and level of negative influence of air pollution on people health according to existing international and national norms.