

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.521.3

Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц

М.В. Панченко, В.С. Козлов, В.В. Польшкин, С.А. Терпугова, А.Г. Тумаков, В.П. Шмаргунов*

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

Поступила в редакцию 25.10.2011 г.

Представлена обобщенная эмпирическая модель оптических характеристик аэрозоля в нижнем 5-км слое атмосферы Западной Сибири. В ее основу положены данные многолетнего самолетного зондирования вертикальных профилей коэффициентов направленного рассеяния, дисперсного состава атмосферного аэрозоля, а также содержания поглощающих частиц. Модель предусматривает восстановление оптических характеристик аэрозоля в видимой и ближней ИК-областях спектра (комплексный показатель преломления, коэффициенты рассеяния и поглощения, оптическая толщина). В качестве исходной информации используются величины коэффициента направленного рассеяния $\mu(45^\circ, 0,51 \text{ мкм})$, функции распределения частиц по размерам, содержания поглощающего вещества («сажи»), параметра конденсационной активности и относительной влажности воздуха на разных высотах.

Ключевые слова: аэрозоль, эмпирическая модель, рассеяние, поглощение, оптические характеристики; aerosol, empirical model, scattering, absorption, optical characteristics.

Введение

Атмосферный аэрозоль является одним из наиболее изменчивых компонентов земной атмосферы. Адекватность радиационных моделей в значительной мере определяется надежностью данных об оптических и микрофизических свойствах аэрозоля [1].

В настоящее время, учитывая огромное разнообразие источников и стоков, химического состава частиц и высокую пространственно-временную изменчивость их свойств, наиболее достоверные сведения об оптических характеристиках аэрозоля и их трансформации под воздействием всего комплекса геофизических процессов на сегодняшний день можно получить только экспериментальным путем.

Этот аспект особо актуален при попытках осуществления радиационных расчетов для условий конкретного региона. Очевидно, что радиационные оценки для безоблачной атмосферы в значительной сте-

пени зависят от способа задания корректного значения альбедо однократного рассеяния атмосферного аэрозоля.

В настоящей статье описан развиваемый нами подход к формированию и совершенствованию эмпирической модели оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири.

Основы подхода

Применяемая нами аппаратура, методы калибровки и проведения измерений достаточно полно представлены в предыдущих публикациях [2–5], поэтому в настоящей статье рассмотрим только некоторые методические аспекты.

Первый методический момент обусловлен необходимостью параметризации связи между аэрозольными характеристиками и относительной влажностью воздуха, которая, являясь одной из наиболее динамичных атмосферных величин, оказывает сильное воздействие на трансформацию микрофизических параметров частиц. Чтобы избежать проблем, связанных с необходимостью выделения влияния влажности на фоне других атмосферных процессов, в основу развиваемого нами метода был положен принцип

* Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Светлана Александровна Терпугова (swet@iao.ru); Александр Георгиевич Тумаков (agt@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru).

раздельного исследования процессов изменчивости сухой основы аэрозольных частиц под воздействием внешних факторов и их конденсационной активности. В современной практике аэрозольных исследований в реальной атмосфере применяется очень большой набор методов и средств изучения свойств аэрозоля. Можно выделить два основных подхода к оценке оптических характеристик [6]. Один из них основывается на сведениях о микрофизическом и химическом составе частиц и последующем расчете необходимых оптических характеристик, другой опирается на результаты оптических измерений.

Преимуществом «микрофизического» подхода является возможность получения расчетных данных практически обо всех необходимых оптических параметрах аэрозоля в заданном спектральном диапазоне. Наиболее серьезным недостатком этого подхода является то обстоятельство, что любое ограничение или искажение сведений о микрофизических параметрах частиц или об их форме приводят к трудно контролируемым и оцениваемым погрешностям восстановления оптического образа, и, следовательно, каждая из этих моделей нуждается в тщательной проверке всех оцениваемых параметров по данным оптических измерений.

Подход к описанию оптических свойств атмосферного аэрозоля, основанный на результатах исследований оптических характеристик непосредственно в реальной атмосфере, в значительной мере свободен от недостатков, присущих микрофизическому моделированию. К недостаткам оптического подхода следует отнести то, что применение полученной информации в этом случае, как правило, ограничено тем диапазоном оптических характеристик и спектральной областью, в которых были получены исходные наблюдательные данные, а выход за их рамки требует дополнительных исследований и обоснования.

Для восстановления оптических параметров, необходимых для проведения радиационных расчетов, нами использована обобщенная эмпирическая модель, базирующаяся на данных самолетного зондирования оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в тропосфере Западной Сибири для высот 0–5 км [7–9].

Общая схема формирования модели

Базой для формирования схемы оценки (восстановления) всего комплекса необходимых для радиационных расчетов оптических характеристик является эмпирическая модель вертикального профиля коэффициента рассеяния [2, 7–9]. Основой этой модели являются результаты анализа статистически обеспеченного массива экспериментальных данных, геофизическая значимость которого подтверждена сравнением синооптических признаков и метеорологических параметров с аналогичными данными многолетних наблюдений в регионе [2, 10]. Схема восстановления вертикального профиля коэффициента рассеяния предусматривает возможность многовариантного учета априорной информации, внешних сезонных,

синоптических признаков и измеряемых оптических и метеорологических характеристик [7, 9].

В настоящей статье представлена процедура ввода в ранее разработанные модели [7, 8, 11] данных многолетних самолетных измерений о вертикальном профиле массовой концентрации поглощающего вещества («сажи») в тропосфере Западной Сибири [3, 12] и схематично описана последовательность восстановления оптических характеристик. Для иллюстрации приведены результаты расчетов с использованием среднесезонных значений (зима, весна, лето, осень).

Первый блок эмпирической модели («оптический») основан на данных измерений с помощью бортового нефелометра, в котором реализован принцип измерения сухой основы аэрозоля и параметра конденсационной активности [8]. Он обеспечивает восстановление вертикального профиля аэрозольного коэффициента рассеяния на длине волны 0,51 мкм под углом 45° [7–9].

Второй блок модели создан на базе измерений высотного профиля функции распределения частиц по размерам с помощью фотоэлектрического счетчика («микрофизический») [11]. Для расчетов оптических параметров функция распределения частиц по размерам была выбрана в двухмодальном варианте: мода субмикронных частиц F и мода грубодисперсных частиц C . Результаты аппроксимации высотной зависимости фактора заполнения V_i для различных сезонов, а также дисперсии σ_i и модального радиуса r_i фракций для сухого аэрозоля представлены в табл. 1.

Расчет необходимого набора спектральных оптических характеристик осуществляется по теории Ми, а привязка расчетных данных к оптической модели для каждого конкретного случая производится на длине волны 0,51 мкм под углом 45°.

Описанная выше схема формирования обобщенной модели первоначально была разработана по данным самолетных измерений, проводимых в 1986–1988 гг. В этот период в составе бортовой аппаратуры приборы для измерения поглощающего вещества («сажи») отсутствовали. Естественно, что для проведения радиационных расчетов на основе эмпирических данных необходимо знание характеристик аэрозольного поглощения. С этой целью эмпирическую модель мы дополнили третьим блоком.

Этап регулярных ежемесячных одновременных измерений на борту самолета-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» коэффициентов аэрозольного рассеяния сухой основы частиц и массовой концентрации сажи был нами начат с 1999 г. [3, 12]. Регистрация массовой концентрации сажи M_{BC} проводилась при наборе высоты и снижении, а также в горизонтальном полете на высотах 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,5 и 7,0 км [12].

Прежде чем ввести в ранее разработанную схему восстановления оптических характеристик информацию о содержании поглощающего вещества, было проведено сопоставление сезонных профилей коэффициента аэрозольного рассеяния для двух циклов наблюдений: 1986–1988 и 1999–2007 гг. (рис. 1).

Как видим, рассматриваемые высотные профили коэффициента аэрозольного рассеяния, полученные

Таблица 1

Параметр	Фракция	
	Субмикронная (<i>F</i>)	Грубодисперсная (<i>C</i>)
<i>Зима</i>		
$\ln \sigma$	0,8 ($\Delta H = 0 \div 5$)	0,75 ($\Delta H = 0 \div 5$)
r , мкм	0,093 ($\Delta H = 0 \div 5$)	3,63 – 7,67H ($\Delta H = 0 \div 0,243$) 1,77 + 0,0079H ($\Delta H = 0,243 \div 5$)
$V \cdot 10^{12}$	$N_s(1,98 + 0,58H)$ ($\Delta H = 0 \div 0,243$) $N_s(2,16 - 0,216H)$ ($\Delta H = 0,243 \div 2,4$) $N_s \cdot 1,65$ ($\Delta H = 2,4 \div 5$)	$N_s(2,36 - 6,12H)$ ($\Delta H = 0 \div 0,243$) $N_s(0,83 + 0,3H)$ ($\Delta H = 0,243 \div 2,4$) $N_s \cdot 1,55$ ($\Delta H = 2,4 \div 5$)
<i>Весна</i>		
$\ln \sigma$	0,8 ($\Delta H = 0 \div 5$)	0,8 ($\Delta H = 0 \div 5$)
r , мкм	0,032 – 0,0013H ($\Delta H = 0 \div 1$) 0,026 + 0,0057H ($\Delta H = 1 \div 5$)	1,4 + 0,196H ($\Delta H = 0 \div 1$) 1,18 + 2,4 exp(-H/0,88) ($\Delta H = 1 \div 5$)
$V \cdot 10^{12}$	$N_s(11,8 - 0,46H)$ ($\Delta H = 0 \div 1,39$) $N_b(1,8 + 36,8 \exp(-H/1,012))$ ($\Delta H = 1,39 \div 5$)	$N_s(1,62 + 0,79H)$ ($\Delta H = 0 \div 1,39$) $N_s(3,06 - 0,39H)$ ($\Delta H = 1,39 \div 5$)
<i>Лето</i>		
$\ln \sigma$	0,8 ($\Delta H = 0 \div 5$)	0,65 ($\Delta H = 0 \div 5$)
r , мкм	0,099 – 0,077H ($\Delta H = 0 \div 0,275$) 0,078 ($\Delta H = 0,275 \div 5$)	2,078 – 0,97H ($\Delta H = 0 \div 0,275$) 1,81 – 0,013H ($\Delta H = 0,275 \div 5$)
$V \cdot 10^{12}$	$N_s(1,73 + 2,31H)$ ($\Delta H = 0 \div 0,275$) $N_s(2,36 + 0,025H)$ ($\Delta H = 0,275 \div 5$)	$N_s(1,28 - 5,16H)$ ($\Delta H = 0 \div 0,275$) $N_s(2,73 - 0,18H)$ ($\Delta H = 0,275 \div 5$)
<i>Осень</i>		
$\ln \sigma$	0,8 ($\Delta H = 0 \div 5$)	0,68 ($\Delta H = 0 \div 5$)
r , мкм	0,051 ($\Delta H = 0 \div 5$)	1,52 + 0,18H ($\Delta H = 0 \div 2$) 1,68 + 3,45 exp(-H/0,62) ($\Delta H = 2 \div 5$)
$V \cdot 10^{12}$	$N_o(4,09 - 0,103H)$ ($\Delta H = 0 \div 5$)	$N_o(2,18 - 0,06H)$ ($\Delta H = 0 \div 5$)

Примечание. N_s , N_b , N_l , $N_o(H)$ – значения измеренных абсолютных счетных концентраций для средних вертикальных профилей концентраций соответственно для зимы, весны, лета и осени, см^{-3} ; H – высота, км; ΔH – значения диапазона высот (км), границы которых вычислены в точках пересечения аппроксимационных кривых (формулы для них выделены жирным шрифтом); значения коэффициентов в формулах получены на основе численной аппроксимации.

в период 1999–2007 гг., вполне согласуются с ранее созданной эмпирической моделью, основанной на массиве данных 1986–1988 гг. Этот факт дает основания полагать, что и данные по поглощающим свойствам аэрозоля вполне адекватно описывают его характеристики в исследуемом регионе, отражают основные черты «аэрозольной погоды» и пригодны для использования в развитии эмпирической модели.

На рис. 2 приведены средние высотные профили массовых концентраций аэрозоля и сажи для разных сезонов года, полученные в период 1999–2007 гг., которые и послужили основой для ввода в эмпирическую модель поглощающего вещества.

Оценка комплексного показателя преломления

Для оценки и последующей апробации радиационных расчетов взяты средние значения вертикального профиля аэрозольного коэффициента рассеяния на длине волны 0,51 мкм под углом 45° [2, 13]. Рассматривались высоты 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4 и 5 км, на которых производились измерения массовой концентрации сажи [12].

Аэрозоль моделировался в виде суммы двух логнормальных фракций с использованием эмпирической микроструктурной модели табл. 1. На первом этапе рассматривались непоглощающие частицы с показателем преломления $n = 1,5$. Параметры фракций (модальный радиус r_i , полуширина распределения σ_i и фактор заполнения V_i) для указанного набора высот подбирались таким образом, чтобы рассчитанный по теории Ми коэффициент направленного рассеяния $\mu(0,51 \text{ мкм}, 45^\circ)$ сухой субмикронной фракции совпадал со среднесезонным значением [2, 13] для данной высоты.

В табл. 2 приведены измеренные на данных высотах значения коэффициента рассеяния [2, 13] и относительной массовой концентрации поглощающего вещества («сажи») P [12] в составе сухой основы аэрозоля, а также подобранные параметры распределений фракций частиц.

Далее проводились модельные оценки комплексного показателя преломления с учетом содержания сажи в аэрозоле. Здесь неизбежно встает вопрос о том, в каком виде присутствует сажа в частицах. Делавшиеся оценки альбедо однократного рассеяния при различных предположениях о содержании сажи

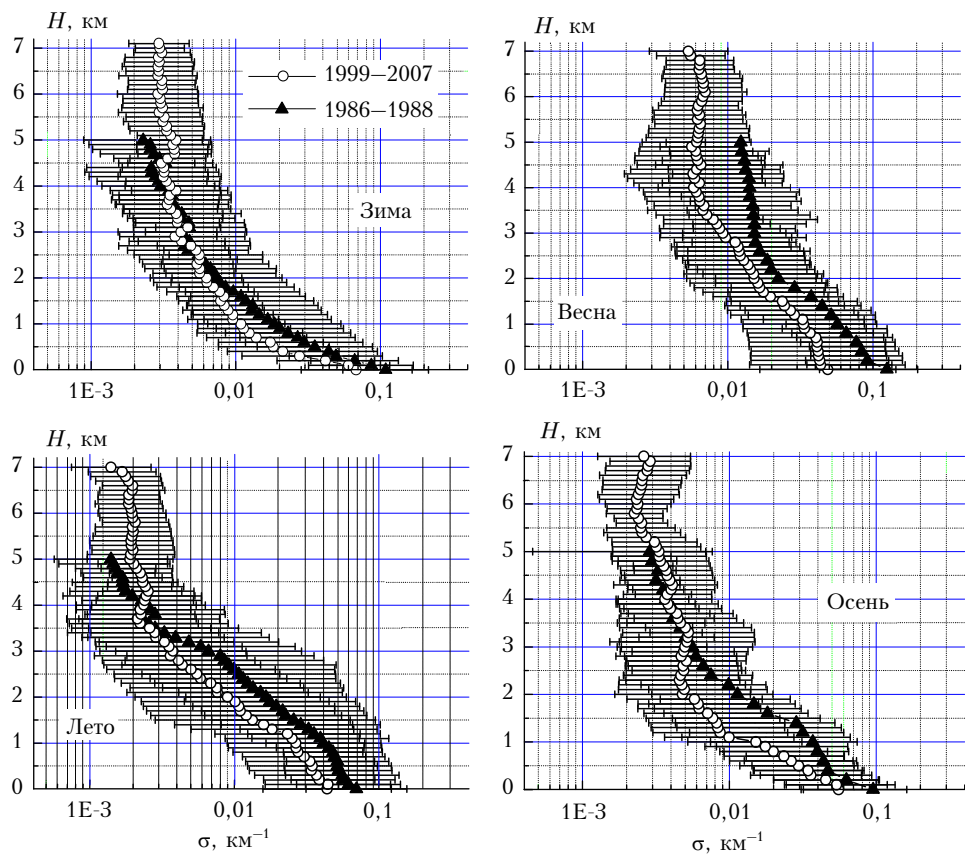


Рис. 1. Сопоставление средних высотных профилей коэффициента аэрозольного рассеяния по данным самолетных измерений в 1999–2007 и 1986–1988 гг. (Западная Сибирь)

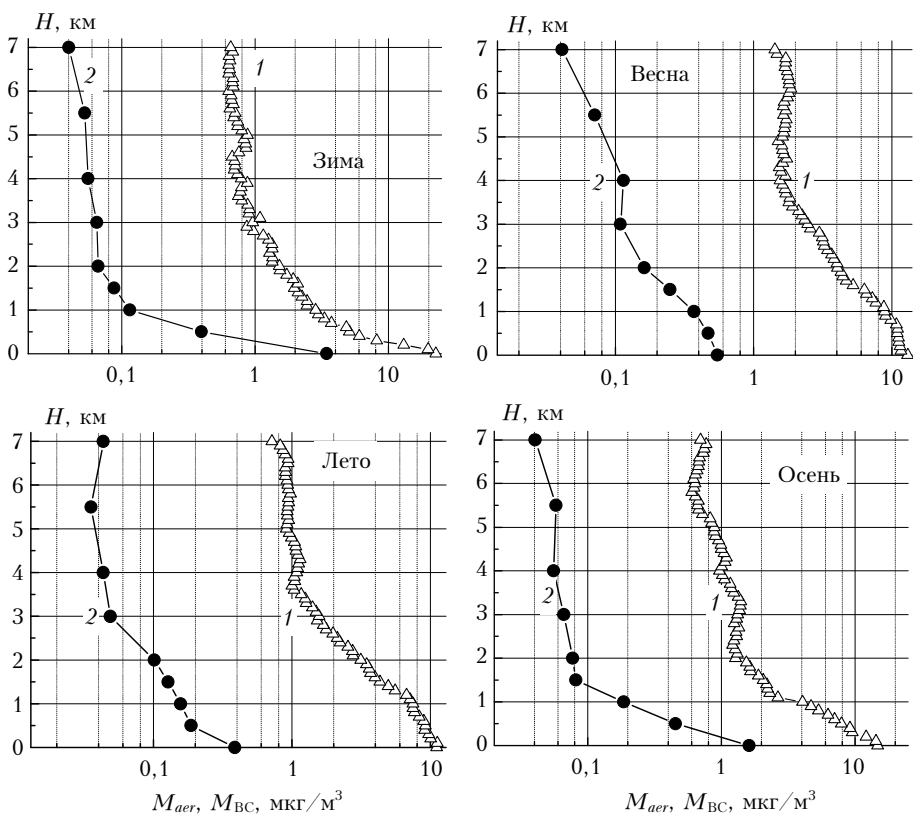


Рис. 2. Средние профили массовых концентраций аэрозоля (1) и сажи (2) в различные сезоны года (1999–2007 гг.)

Таблица 2

H, км	P	$\mu(45^\circ)_{\text{сух}},$ $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	Фракция					
			Субмикронная (F)			Грубодисперсная (C)		
			$\ln \sigma_F$	$r_F, \text{мкм}$	$V_F \cdot 10^{12}$	$\ln \sigma_C$	$r_C, \text{мкм}$	$V_C \cdot 10^{12}$
<i>Зима</i>								
0	0,13	0,0216	0,8	0,093	36,1139	0,75	3,63	43,0491
0,5	0,087	0,00662	0,8	0,093	11,0921	0,75	1,774	5,2974
1	0,043	0,00385	0,8	0,093	6,4590	0,75	1,778	3,7544
1,5	0,045	0,00237	0,8	0,093	3,9648	0,75	1,782	2,7642
2	0,051	0,00137	0,8	0,093	2,2898	0,75	1,786	1,8949
3	0,053	0,000758	0,8	0,093	1,2694	0,75	1,794	1,1924
4	0,051	0,000425	0,8	0,093	0,7129	0,75	1,802	0,6697
5	0,045	0,00034	0,8	0,093	0,5695	0,75	1,81	0,5350
<i>Весна</i>								
0	0,060	0,01378	0,8	0,032	112,03252	0,8	1,4	15,3807
0,5	0,043	0,00897	0,8	0,0314	76,08475	0,8	1,498	13,2507
1	0,037	0,00628	0,8	0,0307	54,76991	0,8	1,596	11,6398
1,5	0,032	0,00456	0,8	0,0345	28,36364	0,8	1,6164	6,9104
2	0,044	0,00247	0,8	0,0374	14,86145	0,8	1,4273	4,9108
3	0,042	0,00168	0,8	0,0431	8,52558	0,8	1,2594	4,3567
4	0,063	0,00156	0,8	0,0488	6,75094	0,8	1,2055	4,0397
5	0,043	0,00136	0,8	0,0545	4,324	0,8	1,1882	2,325
<i>Лето</i>								
0	0,05	0,00977	0,8	0,099	15,4786	0,65	2,078	11,4524
0,5	0,03	0,00707	0,8	0,078	14,1340	0,65	1,8035	15,7276
1	0,03	0,00618	0,8	0,078	12,3560	0,65	1,797	13,2108
1,5	0,03	0,00509	0,8	0,078	10,1780	0,65	1,7905	10,4433
2	0,04	0,00348	0,8	0,078	6,9560	0,65	1,784	6,8406
3	0,04	0,00208	0,8	0,078	4,1560	0,65	1,771	3,7378
4	0,05	0,000607	0,8	0,078	1,2134	0,65	1,758	0,9914
5	0,05	0,000301	0,8	0,078	0,6022	0,65	1,745	0,4435
<i>Осень</i>								
0	0,096	0,0105	0,8	0,051	37,0775	0,68	1,521	19,7626
0,5	0,061	0,00453	0,8	0,051	15,9613	0,68	1,611	8,4974
1	0,054	0,00363	0,8	0,051	12,7923	0,68	1,701	6,8020
1,5	0,035	0,00238	0,8	0,051	8,3732	0,68	1,791	4,4467
2	0,032	0,00126	0,8	0,051	4,4225	0,68	1,881	2,3456
3	0,043	0,000469	0,8	0,051	1,6511	0,68	1,7073	0,8733
4	0,045	0,000377	0,8	0,051	1,3264	0,68	1,6854	0,6996
5	0,053	0,000317	0,8	0,051	1,1151	0,68	1,6811	0,5864

в аэрозоле [14] показали, что абсолютные значения и спектральный ход альбедо могут существенно меняться в зависимости от того, существует ли сажа как отдельная фракция, или же она равномерно распределена по объему аэрозольных частиц (так называемая внутренняя смесь). В свою очередь, в случае как внешней, так и внутренней смеси относительное содержание сажи может зависеть от размера частиц [15, 16]. В литературе известно относительно небольшое число работ, посвященных экспериментам по изучению распределения сажевых частиц по размерам в реальном аэрозоле (см., например, [15 – 18]). Выполненные нами в приземном слое атмосферы исследования с помощью диффузионной батареи позволили оценить медианный радиус массовой концентрации сажи (примерно 0,12 мкм) [17]. Обработка импакторных измерений, проведенных авторами [18] в Вене, и наша аппроксимация этой зависимо-

сти экспоненциальной функцией от размера [15] показали, что эти данные хорошо согласуются с результатами наших аэрометрических исследований с использованием импактора [16]. В работе [16] было выявлено, что на частицы размерами свыше 1 мкм приходится не более 10% от общей массы поглощающего вещества.

Опираясь на результаты этих работ, мы при проведении расчетов использовали гипотезу о том, что 90% сажи приходится на субмикронную фракцию и 10% – на грубодисперсную.

В расчетах предполагалось, что внутри одной фракции сажа в частицах распределена равномерно (не зависит от размера). Комплексный показатель преломления сажи $n = 1,8 - 0,74i$ был взят из данных [19].

Следует заметить, что в самолетном эксперименте для расчета относительной массовой концентрации

сажи $P = M_{BC}/M_{aer}$ использовалось значение массовой концентрации субмикронной фракции аэрозоля M_{aer} , получаемое по данным нефелометрических измерений аэрозольного коэффициента рассеяния. Поэтому и в расчетах показателя преломления значения P брались относительно содержания субмикронной фракции аэрозольных частиц.

Объем сажевой фракции подбирался таким образом, чтобы ее относительная массовая концентрация на каждой высоте совпадала с экспериментальным среднесезонным значением [12]. Для расчетов использовались значения плотности вещества сажи и непоглощающего аэрозоля: $\rho_{BC} = 1,85 \text{ г/см}^3$ и $\rho_{aer} = 1,5 \text{ г/см}^3$.

На первом этапе рассчитывалась объемная концентрация сажи в каждой фракции:

$$V_{BC,i} = PX_i V_F \rho_{aer} / \rho_{BC}, \quad (1)$$

где V_F – фактор заполнения субмикронной фракции (фракции F); P – полученное в эксперименте значение относительной массовой концентрации сажи; X_i – доля сажи в рассматриваемой фракции аэрозоля (в соответствии с принятой гипотезой, $X_F = 0,9$, $X_C = 0,1$); $V_{BC,i}$ – объемная концентрация сажи в соответствующей фракции частиц.

Показатели преломления смеси определялись как их сумма с весом, соответствующим значениям относительного объемного содержания сажи на каждой высоте:

$$n_i = (n_{aer} V_{aer,i} + n_{BC} V_{BC,i}) / (V_{aer,i} + V_{BC,i}), \quad (2)$$

где $V_{aer,i}$ – объемная концентрация соответствующей фракции непоглощающего аэрозоля. Напомним, что в расчетах использовались значения $n_{aer} = 1,5$ и $n_{BC} = 1,8$.

Соответственно для мнимой части показателя преломления

$$\chi_i = \chi_{BC} V_{BC,i} / (V_{aer,i} + V_{BC,i}), \quad (3)$$

где $\chi_{BC} = 0,74$ – показатель поглощения сажевых частиц.

Затем проводилась процедура пересчета действительной и мнимой частей показателя преломления сухого аэрозоля в соответствии со среднесезонными значениями относительной влажности на соответствующих высотах, полученными в ходе самолетного зондирования [2, 13].

Зависимости параметров аэрозоля (радиуса, объемной концентрации, коэффициента рассеяния) от относительной влажности аппроксимировались формулой Хенела [19]. В частности, для коэффициента направленного рассеяния эта формула имеет вид

$$\mu(RH) = \mu_0 (1 - RH(H))^{-\gamma(H)}, \quad (4)$$

где μ_0 – коэффициент рассеяния при нулевой относительной влажности; $RH(H)$ – среднесезонное значение относительной влажности на высоте H ; $\gamma(H)$ – среднесезонный параметр конденсационной активности на соответствующей высоте.

Значения γ на различных высотах являются одним из входных параметров эмпирической модели и также были получены в период проведения самолетного эксперимента [2]. По данным самолетных измерений, на высотах $H \geq 0,5$ км во все сезоны $\bar{\gamma} = 0,5$. Что касается приземных значений, то сезонные различия проявляются достаточно отчетливо. Как показывают данные многолетнего эксперимента по изучению конденсационной активности в г. Томске [21], среднесезонные значения γ следующие: для осени и зимы – $\bar{\gamma} = 0,4$, весны – $0,5$, лета – $0,3$.

В самолетном эксперименте основной измеряемой характеристикой являлся коэффициент направленного рассеяния $\mu(45^\circ)$. Как известно, для субмикронной фракции аэрозоля данная характеристика линейно связана с объемной концентрацией частиц. Таким образом, мы можем записать

$$V_{i,w} = V_i (1 - RH(H))^{-\gamma(H)}, \quad (5)$$

где V_i – объемная концентрация соответствующей «сухой» фракции, $V_{i,w}$ – объемная концентрация «увлажненной» фракции.

Значения действительной и мнимой частей показателя преломления определялись в предположении, что при увлажнении объем фракции увеличивается только за счет приращения воды в составе частиц:

$$n_{i,w} = (n_i V_i + n_B V_B) / V_{i,w}, \quad (6)$$

где n_i – показатель преломления сухого вещества аэрозоля соответствующей фракции, $n_{i,w}$ – показатель преломления i -й фракции после увлажнения, $n_B = 1,33$ – показатель преломления жидкой воды; V_B – объем конденсированной воды (т.е. приращение объема аэрозольных частиц, $V_B = V_{i,w} - V_i$).

Соответственно для мнимой части показателя преломления, поскольку показатель поглощения воды $\chi_B = 0$:

$$\chi_{i,w} = \chi_i V_i / V_{i,w}. \quad (7)$$

Далее при выборе варианта расчета микрофизических характеристик аэрозоля при реальном значении относительной влажности нами были испытаны следующие две схемы:

1) увлажняются только частицы субмикронной фракции;

2) увлажняются обе фракции.

Для примера на рис. 3 проведено сравнение двух наших вариантов расчета аэрозольной оптической толщины для летнего сезона с результатами работы [22], в которой представлены данные о средних значениях АОТ, измеренных в нашем регионе в 1995–2005 гг. Как видим, вариант расчета, при котором увлажняются частицы и субмикронной, и грубодисперсного диапазонов, приводит к тому, что уже при длине волны $0,7$ мкм и далее начинают наблюдаться заметные расхождения рассчитанных и измеренных характеристик.

В то же время результаты расчета по первому варианту достаточно хорошо согласуются во всем спектральном диапазоне от $0,4$ до 1 мкм.

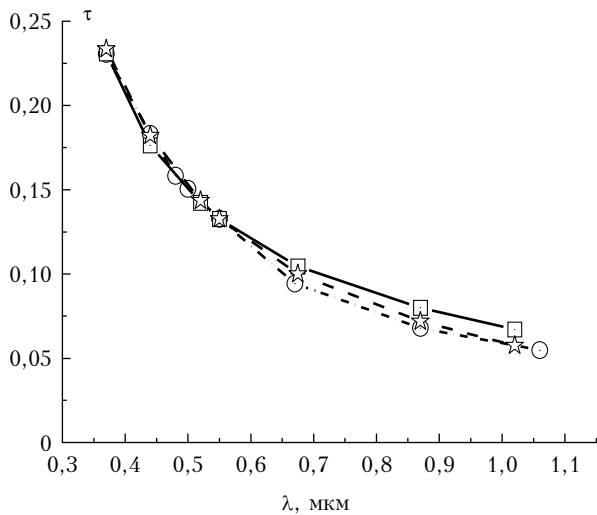


Рис. 3. Нормированный спектральный ход аэрозольной оптической толщи для летнего сезона (нормировка на длине волны 0,55 мкм); кружки – данные работы [21], квадраты – расчет с увлажнением двух фракций F и C , звездочки – увлажняется только субмикронная фракция F

Первый вариант расчета (увлажнение только фракции F) также лучше согласуется с результатами измерений спектральных и поляризационных характеристик рассеянного излучения в приземном слое атмосферы [23], поэтому для расчетов оптических постоянных был использован именно этот вариант (рис. 4).

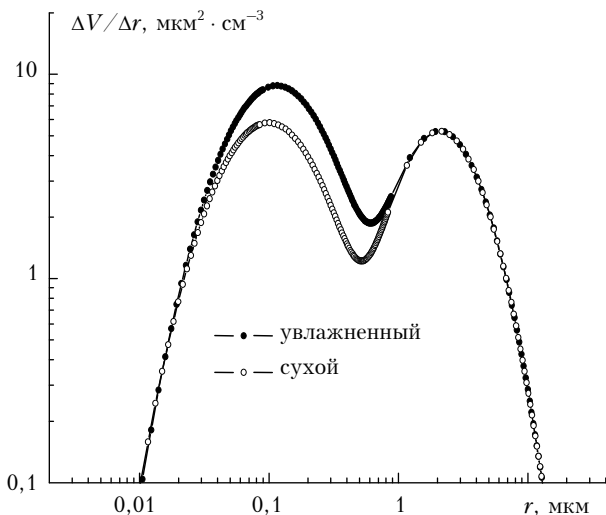
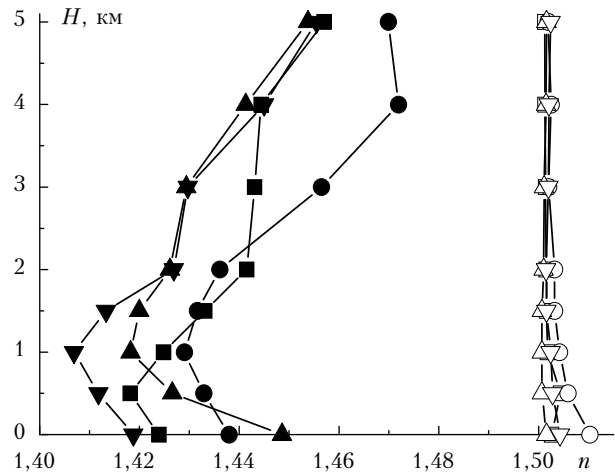
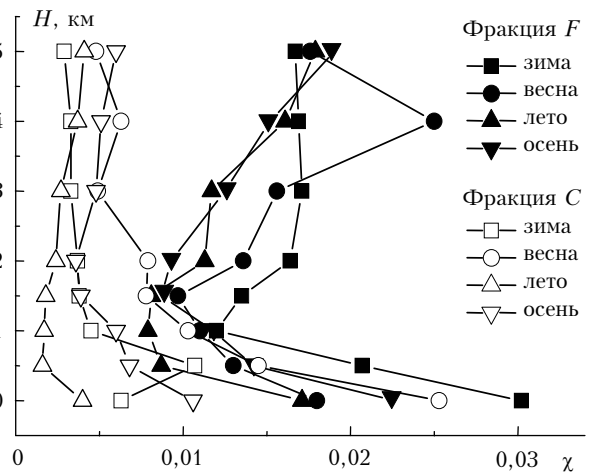


Рис. 4. Пример вида функции распределения частиц по размерам $\Delta V/\Delta r$ сухого и увлажненного аэрозоля (лето, высота $H = 0$ км)

На рис. 5 приведены вертикальные профили восстановленных значений действительной n (рис. 5, *a*) и мнимой частей показателя преломления χ (рис. 5, *б*) для субмикронной F и грубодисперсной фракций C , которые и предлагается использовать для расчета всех необходимых радиационно-значимых характеристик (спектральных значений оптической аэрозоль-



a



б

Рис. 5. Вертикальный профиль восстановленных значений действительной n (*a*) и мнимой частей показателя преломления χ (*б*) субмикронной F и грубодисперсной C фракций

ной толщи, альbedo однократного рассеяния и фактора асимметрии).

Заключение

В основу обобщенной эмпирической модели оптических характеристик аэрозоля для нижнего 5-км слоя атмосферы Западной Сибири положены данные многолетнего самолетного зондирования вертикальных профилей коэффициентов направленного рассеяния, дисперсного состава атмосферного аэрозоля, а также содержания поглощающих частиц. Необходимо подчеркнуть, что полученные результаты относятся к средним значениям восстанавливаемых величин для каждого из сезонов года. Разумеется, что непосредственно среднесезонные профили, осредненные для всего разнообразия синоптических ситуаций, вряд ли целесообразно применять к детальным радиационным оценкам. Но предлагаемая нами модель обеспечивает возможность восстановления необходимых оптических характеристик для каждой конкретной атмосферной реализации (в том числе

и для разных способов задания содержания поглощающего вещества в спектре аэрозольного распределения), если исследователь располагает каким-либо набором измеряемых величин, являющихся входными параметрами модели (например, данными о приземных значениях коэффициентов рассеяния, величине аэрозольной оптической толщи, метеорологических параметрах и т.д.).

В заключение авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Т.Б. Журавлевой, которая инициировала работу по радиационным расчетам применительно к нашему региону на базе эмпирической модели при выполнении программы ОНЗ-11.1 РАН и государственных контрактов 02.740.11.0674 и 14.740.11.0204.

Многолетний цикл работ выполнен при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 95-05-14195, 03-05-64787, 06-05-64393, 10-05-00162).

Полученные в 2011 г. гранты РФФИ по поддержке материальной базы № 11-05-05013 и гранты № 11-05-93119-НЦНИЛ, 11.519.11.5009 позволяют надеяться на дальнейшее развитие модели, в том числе и для арктических регионов.

1. *Ивлев Л.С.* Аэрозольное воздействие на климатические процессы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 5. С. 392–410.
2. *Panchenko M.V., Terpigova S.A., Tumafov A.G.* Annual variations of submicron aerosol fraction as assessed from the data of airborne nephelometric measurements // *Atmos. Res.* 1996. V. 41. P. 203–215.
3. *Panchenko M.V., Kozlov V.S., Terpigova S.A., Shmargunov V.P., Burkov V.V.* 2000: Simultaneous measurements of submicron aerosol and absorbing substance in the height range up to 7 km // *Proc. Tenth ARM Science Team Meeting.* San-Antonio, Texas, 13–19 March 2000, http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_0003/panchenko-mv.pdf
4. *Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И.* Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // *Оптика атмосфер. и океана.* 1992. Т. 5, № 10. С. 1012–1021.
5. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сафатов А.С., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П.* Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследования окружающей среды // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 10. С. 950–957.
6. *Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Рахимов Р.Ф., Сакерин С.М., Белан Б.Д.* Геофизические факторы формирования аэрозольной погоды Западной Сибири // *Оптика атмосфер. и океана.* 1999. Т. 12, № 10. С. 922–934.
7. *Panchenko M.V., Terpigova S.A.* Reconstruction of the scattering coefficient in the lower troposphere using ground-based measurements // *J. Atmos. Sci.* 2002. V. 59, N 3. P. 581–589.
8. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Польшкин В.В.* Эмпирическая модель оптических характеристик аэрозоля нижней тропосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 1998. Т. 11, № 6. С. 615–624.
9. *Панченко М.В., Терпугова С.А.* Схема восстановления коэффициентов рассеяния в нижней тропосфере // *Оптика атмосфер. и океана.* 1996. Т. 9, № 12. С. 1562–1572.
10. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М.* Методические аспекты самолетных нефелометрических исследований тропосферного аэрозоля в региональном масштабе // *Оптика атмосфер. и океана.* 1994. Т. 7, № 8. С. 1022–1032.
11. *Панченко М.В., Польшкин В.В.* Представление о микроструктуре тропосферного аэрозоля Сибири на основе измерений фотоэлектрическим счетчиком // *Оптика атмосфер. и океана.* 2001. Т. 14, № 6–7. С. 526–537.
12. *Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Панченко М.В.* Сезонная изменчивость вертикальных профилей поглощающих характеристик субмикронного аэрозоля в тропосфере // *Оптика атмосфер. и океана.* 2009. Т. 22, № 7. С. 635–642.
13. *Панченко М.В., Терпугова С.А.* Годовой ход содержания субмикронного аэрозоля в тропосфере над Западной Сибирью // *Оптика атмосфер. и океана.* 1994. Т. 7, № 8. С. 1033–1044.
14. *Terpigova S.A., Panchenko M.V., Kozlov V.S.* Estimation of the effect of black carbon on the single scattering albedo of submicron aerosol // *Abstracts of European Aerosol Conf. 28 August – 2 September 2005.* Ghent, Belgium. P. 704.
15. *Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P., Shmargunov V.P., Chernov D.G.* Results of long-term measurements of the Black Carbon concentration in the troposphere in Siberia // *Abstracts of 10th Conference on carbonaceous particles in the atmosphere.* Vienna. 26–29.06.2011, <http://www.iccpa.net>, p. 76.
16. *Kozlov V.S., Panchenko M.V., Pol'kin V.V., Shmargunov V.P., Yausheva E.P.* About contribution of coarse particles into the mass concentration of soot in near-ground aerosol // *XV Int. Sympos. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics»: Abstracts.* Tomsk: IAO SB RAS, 2008. P. 109–110.
17. *Kozlov V.S., Panchenko M.V., Kozlov A.S., Ankilov A.N., Baklanov A.M., Malyshkin S.B.* Instrumental and Technical Approach to Prompt Field Measurements of Size Distributions of Aerosol Absorbing and Scattering Characteristics // *Proc. Twelfth Atmos. Radiat. Measurement (ARM) Science Team Meeting.* St. Petersburg, Florida. April 8–12. 2002. [http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_0204/kozlov\(2\)-vs.pdf](http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_0204/kozlov(2)-vs.pdf)
18. *Hitzemberger R., Tolno S.* Comparison of black carbon (BC) aerosols in two urban areas – concentrations and size distributions // *Atmos. Environ.* 2001. V. 35. P. 2153–2167.
19. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
20. *Hanel G.* The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // *Adv. in Geophys.* 1976. V. 19. P. 73–188.
21. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Козлов В.С., Польшкин В.В., Яушева Е.П.* Годовой ход конденсационной активности субмикронного аэрозоля в приземном слое атмосферы Западной Сибири // *Оптика атмосфер. и океана.* 2005. Т. 18, № 8. С. 678–683.
22. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 0,37–4 мкм // *Оптика атмосфер. и океана.* 2007. Т. 20, № 2. С. 156–164.
23. *Панченко М.В., Свириденков М.А., Терпугова С.А., Козлов В.С.* Активная спектрофелометрия в исследовании микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля // *Оптика атмосфер. и океана.* 2004. Т. 17, № 5–6. С. 428–436.

M.V. Panchenko, V.S. Kozlov, V.V. Polkin, S.A. Terpugova, A.G. Tumakov, V.P. Shmargunov. **Retrieval of optical characteristics of the tropospheric aerosol in West Siberia on the basis of generalized empirical model taking into account absorption and hygroscopic properties of particles.**

The paper presents the generalized empirical model of the aerosol optical characteristics in the lower 5-km layer of the atmosphere of West Siberia. The model is based on the data of long-term airborne sensing of the vertical profiles of the angular scattering coefficient, aerosol disperse composition, as well as the content of absorbing particles. The model provides for retrieval of the aerosol optical characteristics in visible and near IR wavelength ranges (complex refractive index, scattering and absorption coefficients, optical depth). The input data are the values of the angular scattering coefficient $\mu(45^\circ, 0.51 \mu\text{m})$, particle size distribution function, concentration of absorbing substance ("soot"), parameter of condensation activity, and relative humidity of air at different heights.