

Свойства атмосферного аэрозоля в дымовых шлейфах лесных пожаров по данным спектрофелометрических измерений

Р.Ф. Рахимов, В.С. Козлов, М.В. Панченко, 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 23.05.2013 г.

В июле–августе 2012 г. в г. Томске с помощью поляризационного спектрофелометра был выполнен цикл измерений коэффициентов направленного аэрозольного рассеяния в условиях экстремально плотной дымовой мглы лесных пожаров в Сибири. Дисперсный состав мглы содержал микродисперсную (с радиусами < 150 нм) и среднелдисперсную (с максимумом объемного распределения около 350 нм) фракции частиц. Эффективный радиус частиц составил около 220 нм. Дымовая мгла характеризовалась слабым поглощением: значения показателей поглощения микродисперсных и среднелдисперсных частиц равнялись $\sim 0,038$ и $\sim 0,012$ соответственно. Среднее значение альбедо однократного рассеяния на длине волны 525 нм составило около 0,91. В плотной дымовой мгле наблюдалась высокая корреляционная связь между объемными коэффициентами обратного рассеяния и ослабления, свидетельствующая в пользу применимости однопараметрической модели для описания оптико-микрофизических свойств задымленной атмосферы. При «распаде» дымовой мглы (в периферийных зонах дымовых шлейфов) возрастает оптический вклад микродисперсной фракции, проявляющийся в увеличении показателя поглощения микродисперсных частиц до $\sim 0,5$ и в уменьшении альбедо от 0,91 до 0,84.

Ключевые слова: думы лесных пожаров, натурные измерения, поляризационная угловая спектрофелометрия, оптические и микрофизические свойства, сажа; smokes of forest fires, natural measurements, angular polarization spectrophelometry, optical and microphysical properties, soot.

Введение

Вместе с активным освоением природно-сырьевых ресурсов Западной Сибири и усилением процесса урбанизации в регионе отмечены заметное расширение в теплый период года площадей возгорания лесов и торфяников и, как следствие, увеличение объемов эмиссии продуктов термического разложения лесных горючих материалов (ЛГМ) в атмосферу. Возрастание масштабов углеродосодержащих эмиссий обуславливает неоднозначные изменения состояния климатически активных компонентов. В частности, деформации микро- и макроструктуры облачных полей, вызванные активным проникновением дымовых аэрозолей в атмосферу, а также изменения отражательной способности подстилающей поверхности ведут к трудно прогнозируемым вариациям величины радиационного форсинга [1].

В [2–4], опираясь на результаты лабораторных дымовых экспериментов в Большой аэрозольной камере (БАК) ИОА СО РАН, были рассмотрены

механизмы трансформации газовой-дисперсных смесей и оценена эффективность формирования сажевой, умеренно и слабопоглощающих составляющих аэрозольного компонента. Настоящая статья является продолжением указанных статей, в ней изменения состава аэрозоля анализируются по временным рядам значений коэффициента направленного аэрозольного рассеяния $\beta_s(t)$, измеренных спектрофелометром при заборе аэрозольных проб из атмосферы.

Аппаратура и методика исследований

Модификация поляризационного спектрофелометра APSN-02 [5] позволяет проводить в автоматизированном режиме с шагом 7–10 мин оптические измерения коэффициента направленного аэрозольного рассеяния $\beta_s(t)$ для четырех длин волн $\lambda_i = 455, 525, 585$ и 630 нм, пяти углов рассеяния $\theta_j = 15, 45, 110, 135, 165^\circ$ и двух ортогональных состояний поляризации. Высокая чувствительность и стабильность измерений спектральных коэффициентов рассеяния достигаются за счет применения мощных 4-цветных светодиодов LZ4-20MA10, контроля их интенсивности, вычитания темновых сигналов, накопления полезного сигнала, а также использования современного фотоприемника типа Hamamatsu H7468, считывающего последовательно

* Рустам Фуатович Рахимов (temur@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Александр Георгиевич Тумаков (agt@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru).

в течение единичного цикла (3–7 мин) с погрешностью 3% набор из 40 элементов вектора измерений.

Использование поляризационной спектрофелометрии для исследования оптико-микрофизических свойств аэрозолей в сочетании с решением обратной задачи позволяет оценивать изменения распределения частиц по размерам и определять комплексный показатель преломления (КПП) частиц $m = n - i\alpha$.

Высокая чувствительность спектрофелометра APSN-02 существенно расширила возможности нефелометрического подхода для изучения динамики аэрозольных сред. В частности, стало возможным изучение особенностей всех стадий формирования и эволюции смешанных и пиролизных дымов в БАК в течение 2 сут и более, а также исследования изменчивости аэрозольного состава внутри БАК при подаче в камеру наружного атмосферного воздуха [2–4].

По результатам обращения спектрофелометрических измерений для смешанных дымов в составе микродисперсной фракции частиц выявлена высокая концентрация поглощающих веществ, близких по значениям мнимой и действительной частей КПП к характеристикам сажи. Оценки показали, что значения КПП дымовых частиц существенно меняются по спектру размеров, что потребовало доработать методику решения обратной задачи, учитывающую различия КПП на трех интервалах шкалы размеров [6]. Полученные в [2–4] оценки показали, во-первых, что наибольшие значения мнимой части КПП $\alpha \sim 0,9$ характерны прежде всего для микродисперсной фракции смешанных дымов (радиус $r < 150$ нм). Во-вторых, значения α заметно уменьшаются для средне- и крупнодисперсных частиц.

Для исследования оптико-микрофизических свойств приземного атмосферного аэрозоля была создана магистраль подачи наружного воздуха в проточном режиме в камеру спектрофелометра. С целью снижения влияния на оптические измерения вариаций концентрации аэрозольных частиц в атмосфере воздух сначала поступал в демпфи-

рующую емкость объемом 200 л и затем в камеру нефелометра. Забор аэрозольных проб производился на высоте 5 м от подстилающей поверхности на удалении 1 м от стены корпуса модельных установок ИОА СО РАН, в котором был размещен спектрофелометр.

В июне–августе 2012 г. в периоды вторжения в регион дымовой мглы обширных лесных пожаров в Томской области и Красноярском крае с помощью спектрофелометра APSN-02 был выполнен цикл круглосуточных измерений спектральных коэффициентов направленного рассеяния атмосферного аэрозоля в условиях задымленной атмосферы [7].

Результаты наблюдений

На рис. 1 представлены для длины волны 525 нм временные развертки нефелометрических измерений перпендикулярно поляризованной компоненты коэффициента направленного рассеяния $\beta_s(t, \theta = 45^\circ)$ за период с 27 июля по 14 августа 2012 г. Приведенные зависимости иллюстрируют сильную временную изменчивость коэффициента аэрозольного рассеяния за период измерений – более чем на 2 порядка величины. Наблюдаемая картина в среднем соответствует убыванию дымового аэрозоля в приземном слое воздуха. Столь же значительными были и вариации временных рядов других коэффициентов направленного рассеяния $\beta_s(t, \lambda_i, \theta_j)$. Полные временные ряды измерялись с шагом 30 мин и содержат более 850 точек.

Для подробного анализа выбран период с 27 по 29 июля, когда наблюдались максимальное за июль–август задымление воздуха (27 июля) и последующее ослабление («распад») дымовой мглы (ДМ) в течение 2 сут (на рис. 2 анализируемые временные эпизоды выделены эллипсами).

Отметим, что в летний период в нашем регионе в незадымленной атмосфере средние значения коэффициента направленного аэрозольного рассеяния под углом 45° на длине волны 510 нм, как правило,

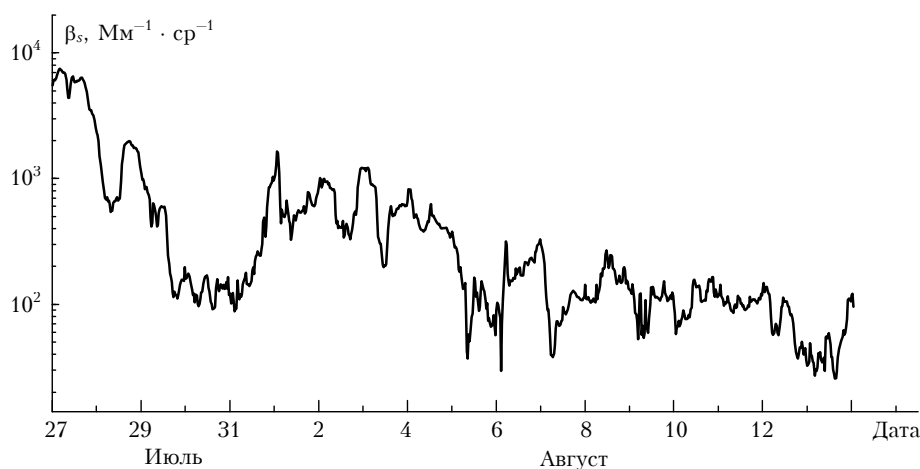


Рис. 1. Временная развертка перпендикулярно поляризованной компоненты коэффициента направленного аэрозольного рассеяния β_s ($\lambda_i = 525$ нм, $\theta_j = 45^\circ$) по результатам измерений в дымовой мгле лесных пожаров в июле–августе 2012 г.

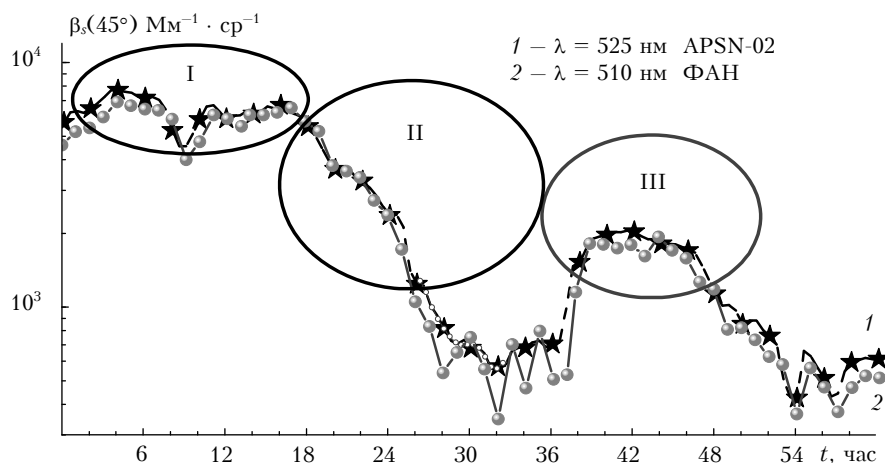


Рис. 2. Сопоставление временной динамики значений коэффициента направленного аэрозольного рассеяния дымовой мглы, измеренных двумя нефелометрами (на оси времени 0 ч соответствует 0 ч 27 июля 2012 г.)

варьируют в диапазоне $3\text{--}8 \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ [8]. На рис. 2 проводится сопоставление оптических данных, измеренных в ДМ одновременно поляризационным спектронефелометром APSN-02 и фотоэлектрическим аэрозольным нефелометром ФАН, используемым на Аэрозольной станции ИОА СО РАН для круглосуточного почасового мониторинга содержания субмикронного аэрозоля в приземном слое воздуха [8]. Видно, что для большинства полученных данных (85–90%) наблюдается хорошее качественное и количественное согласие результатов измерений разными нефелометрами в двух точках, разнесенных между собой на расстояние около 150 м.

В экстремально плотной дымовой мгле 27 июля коэффициент направленного рассеяния β_s достигал максимальных значений $\sim 7500 \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$, которые варьировали в среднем в 2 раза (см. рис. 2). Анализ метеорологических условий в июне–августе показал, что основные волны роста задымленности воздуха были связаны с ветрами северного и северо-восточного направлений [9]. Определенную модуляцию в эту динамику вносили и дожди.

Отметим, что анализ распределений по размерам суммарного сечения аэрозольных частиц dS/dr позволяет более детально проследить изменения свойств микродисперсной ($r < 150 \text{ нм}$) и среднедисперсной ($150 < r < 400 \text{ нм}$) фракций. Рис. 3, а иллюстрирует уменьшение в 1,6 раза сечения микродисперсных частиц на начальной стадии мглы 27 июля с 4,4 до 12 ч. В свою очередь анализ объемных распределений dV/dr более информативен для оценок состава средне- и крупнодисперсной фракций. Обращает на себя внимание определенная устойчивость формы распределений объема частиц по размерам (рис. 3, б). Важной особенностью плотного дымового смога является преобладающее содержание среднедисперсной фракции частиц с максимумом объемного распределения в диапазоне радиусов 300–350 нм. Изменение доли среднедисперсных частиц в дымовой мгле предопределяет особенности динамики оптических характеристик.

В результате решения обратной задачи удалось получить подробную информацию о временной изменчивости дисперсного состава и других оптико-микрофизических характеристик дымового аэрозоля. Полученные данные приведены в таблице. В 1-м столбце даны условные номера точек, для которых приводятся результаты обращения. Строки описывают временную изменчивость характеристик (время указано во 2-й колонке в часах, с началом отсчета от 0 ч 27 июля). В 3–5-й колонках приводятся для трех интервалов дисперсности значения $m = n - i \cdot \kappa$ (где κ – мнимая и n – действительная части показателя преломления). В этой части таблицы также указаны границы интервалов дисперсности. В 6–8-й колонках даны значения интегральных характеристик аэрозоля для всего спектра размеров дымовых частиц: N – полная счетная концентрация, S – полное сечение, V – полный объем частиц. В 9-й колонке приведен эффективный радиус частиц $r_{\text{эф}}$, оцениваемый через отношение параметров V и S . В 10-й и 11-й колонках указаны значения объемных коэффициентов ослабления $\beta_s(t)$ и обратного рассеяния $\beta_p(t)$, рассчитанные по теории Ми с учетом приведенной в таблице информации о микроструктуре частиц и значениях КПП. В 12-й колонке даны значения альбедо однократного рассеяния ω на длине волны 525 нм, рассчитанные по значениям объемных коэффициентов рассеяния и ослабления – $\omega = \beta_s(t)/\beta_s(t)$.

Из первых пяти строк таблицы, соответствующих по времени данным наблюдений в условиях экстремально плотной ДМ (I стадия измерений, рис. 3, а, б), видно, что для частиц среднедисперсной фракции значения КПП сравнительно устойчивы как по реальной части $n \sim 1,57$, так и по мнимой части $\kappa \sim 0,012$. Слабо меняются как эффективный радиус дымовых частиц $r_{\text{эф}} \sim 220 \text{ нм}$, так и величина $\omega(t) \sim 0,91$. Значения объемных коэффициентов ослабления $\beta_s(t)$ и локационного рассеяния $\beta_p(t)$ варьируют в согласии с динамикой dS/dr (рис. 3, а) и с временной изменчивостью N , S , $V(t)$. Отметим

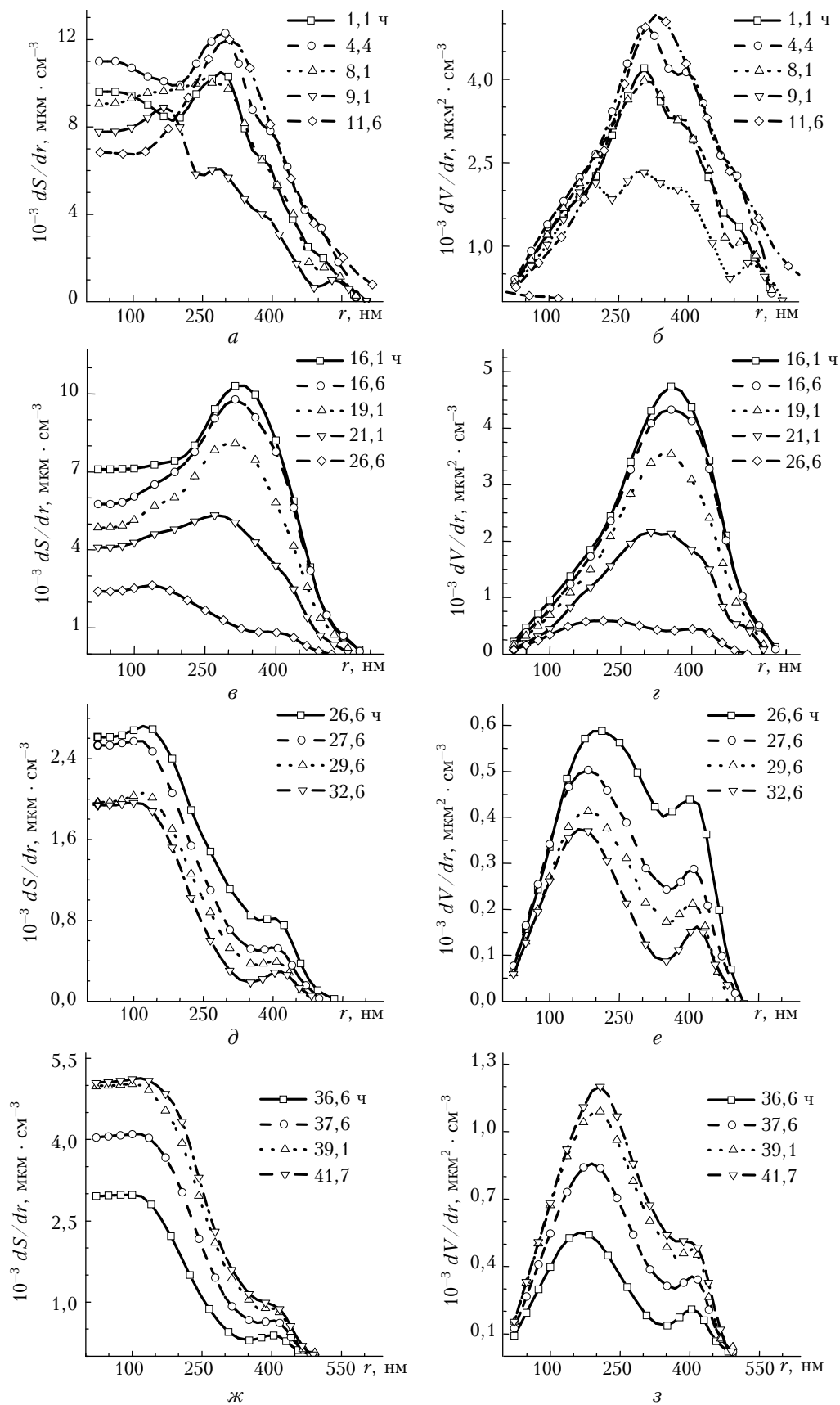


Рис. 3. Распределения по размерам суммарного сечения dS/dr и объема dV/dr частиц дымовой мглы: *а, б* – плотная мгла (I период на рис. 2); *в, г* – начало снижения задымления воздуха 28 июля (II период); *д, е* – завершение снижения задымления; *ж, з* – приход в район измерений второго дымового шлейфа (III период с 13 до 18 ч 28 июля на рис. 2)

Пофракционное изменение комплексного показателя преломления и других параметров дымов во времени (27–29.07.2012 г.)

№ точки	t , ч	I интервал, нм (микро-)		II интервал, нм (средне-)		III интервал, нм (крупно-)		$N \cdot 10^{-3}$, см ⁻³	$S \cdot 10^{-2}$, МКМ ² · см ⁻³	$V \cdot 10^{-1}$, МКМ ³ · см ⁻³	$r_{эф}$, нм	$\beta_g \cdot 10^{-3}$, ММ ⁻¹	$\beta_n \cdot 10^{-3}$, ММ ⁻¹	ω
1	2	3		4		5		6	7	8	9	10	11	12
4	1	$r_n = 30$ $n = 1,51$	$r_k = 256$ $\alpha = 38e-3$	$r_n = 246$ $n = 1,57$	$r_k = 469$ $\alpha = 11e-4$	$r_n = 469$ $n = 1,61$	$r_k = 593$ $\alpha = 32e-4$	131	162	120	223	10,6	3,96	0,874
10	4	$r_n = 30$ $n = 1,49$	$r_k = 247$ $\alpha = 38e-3$	$r_n = 247$ $n = 1,57$	$r_k = 478$ $\alpha = 83e-5$	$r_n = 478$ $n = 1,60$	$r_k = 598$ $\alpha = 31e-4$	151	196	152	233	11,2	3,66	0,908
17	8	$r_n = 30$ $n = 1,51$	$r_k = 239$ $\alpha = 38e-3$	$r_n = 239$ $n = 1,57$	$r_k = 485$ $\alpha = 12e-4$	$r_n = 485$ $n = 1,55$	$r_k = 598$ $\alpha = 21e-4$	128	164	121	222	9,27	2,63	0,906
19	9	$r_n = 30$ $n = 1,52$	$r_k = 213$ $\alpha = 38e-3$	$r_n = 213$ $n = 1,58$	$r_k = 500$ $\alpha = 14e-4$	$r_n = 500$ $n = 1,62$	$r_k = 588$ $\alpha = 32e-4$	107	119	80	202	6,06	1,68	0,895
24	12	$r_n = 30$ $n = 1,46$	$r_k = 224$ $\alpha = 22e-3$	$r_n = 224$ $n = 1,56$	$r_k = 475$ $\alpha = 11e-4$	$r_n = 475$ $n = 1,61$	$r_k = 588$ $\alpha = 31e-4$	143	177	134	227	9,57	2,97	0,918
36	16	$r_n = 30$ $n = 1,77$	$r_k = 100$ $\alpha = 51e-2$	$r_n = 100$ $n = 1,55$	$r_k = 363$ $\alpha = 15e-4$	$r_n = 363$ $n = 1,59$	$r_k = 595$ $\alpha = 24e-4$	126	156	127	245	10,7	2,70	0,846
38	19	$r_n = 30$ $n = 1,67$	$r_k = 97$ $\alpha = 51e-2$	$r_n = 97$ $n = 1,56$	$r_k = 362$ $\alpha = 16e-4$	$r_n = 362$ $n = 1,59$	$r_k = 567$ $\alpha = 22e-4$	90	118	96	243	7,80	2,09	0,881
43	21	$r_n = 30$ $n = 1,59$	$r_k = 118$ $\alpha = 15e-2$	$r_n = 118$ $n = 1,55$	$r_k = 364$ $\alpha = 12e-4$	$r_n = 364$ $n = 1,59$	$r_k = 567$ $\alpha = 20e-4$	74	83	62	225	5,04	1,31	0,906
54	27	$r_n = 30$ $n = 1,42$	$r_k = 108$ $\alpha = 16e-2$	$r_n = 108$ $n = 1,54$	$r_k = 345$ $\alpha = 11e-4$	$r_n = 345$ $n = 1,58$	$r_k = 550$ $\alpha = 20e-4$	43	33	19	175	1,48	0,331	0,901
60	30	$r_n = 30$ $n = 1,34$	$r_k = 108$ $\alpha = 23e-2$	$r_n = 108$ $n = 1,53$	$r_k = 345$ $\alpha = 69e-5$	$r_n = 345$ $n = 1,58$	$r_k = 515$ $\alpha = 16e-4$	32	22	11	155	0,869	0,182	0,877
66	33	$r_n = 30$ $n = 1,34$	$r_k = 103$ $\alpha = 27e-2$	$r_n = 103$ $n = 1,54$	$r_k = 345$ $\alpha = 12e-4$	$r_n = 345$ $n = 1,57$	$r_k = 496$ $\alpha = 17e-4$	31	19	9	145	0,709	0,131	0,839
88	44	$r_n = 30$ $n = 1,34$	$r_k = 115$ $\alpha = 15e-2$	$r_n = 115$ $n = 1,54$	$r_k = 352$ $\alpha = 10e-4$	$r_n = 352$ $n = 1,6$	$r_k = 514$ $\alpha = 13e-4$	76	53	28	161	2,21	0,487	0,893
95	47	$r_n = 30$ $n = 1,34$	$r_k = 112$ $\alpha = 15e-2$	$r_n = 112$ $n = 1,54$	$r_k = 356$ $\alpha = 99e-5$	$r_n = 356$ $n = 1,6$	$r_k = 516$ $\alpha = 13e-4$	63	45	24	163	1,90	0,416	0,899

также, что мнимая часть КПП частиц микродисперсной фракции, составляя в среднем 0,038, более чем в 3 раза превосходит показатель поглощения частиц среднedisперсной фракции, что согласуется с полученными нами ранее в [3] оценками для дымов смешанного состава.

Второй выбранный отрезок измерений (16,1–36,6 ч) (рис. 3, в, з) соответствует данным при уменьшении плотности задымления воздуха, которое может быть вызвано различными факторами. Это могут быть как процессы распада мглы под влиянием поступления в район измерений менее задымленных воздушных масс с различных направлений, так и под воздействием периферийных зон дымовых шлейфов.

Представленные на рис. 3, в, з результаты обращения измерений показывают, что по мере распада ДМ существенно уменьшается содержание как микродисперсной, так и среднedisперсной фракций дымового аэрозоля. Как видно, в ходе этого процесса частицы среднedisперсной фракции постепенно утрачивают свое доминирующее значение по вкладу в оптические свойства (см., например, кривую для $t = 26,6$ ч).

Из таблицы следует, что в этих условиях, по сравнению с первым эпизодом, среднее значение мнимой части КПП для среднedisперсной фракции немного увеличилось (до $\alpha \sim 0,015$). Значительно сильнее варьирует поглощение для микродисперсной фракции, сначала оно сильно возросло до $\alpha \sim 0,5$, затем снизилось до $\sim 0,23$, при этом было заметно выше оценок поглощения для частиц среднedisперсной фракции. Отмеченная динамика привела к уменьшению значений альbedo однократного рассеяния ω в диапазоне от 0,91 до $\sim 0,84$. Изменчивость значений объемного коэффициента ослабления $\beta_e(t)$ и локационного рассеяния $\beta_\pi(t)$ при распаде ДМ указывает на 15–20-кратное «просветление» воздушной среды.

Аналогичные особенности изменений параметров дымового смога прослеживаются и на заключительной стадии распада ДМ до $t \sim 32,6$ ч (рис. 3, д, е), характеризуясь снижением оптической плотности дыма до минимума. Рис. 3, е показывает, что при завершении распада дымовой мглы происходит определенное возрастание оптического влияния микродисперсной фракции $r < 200$ нм, что проявляется в согласованном изменении ω и показателя поглощения мелких частиц α_1 (см. таблицу). Процесс распада ДМ, начавшись 27 июля в 16 ч дня, завершился к 12 ч дня 28 июля (II период).

Далее, на III стадии наблюдений (36,6–53,6 ч, рис. 3, ж, з) отмечены приход в район измерений второго дымового шлейфа и его распад (см. рис. 1 и 2). Максимальная оптическая плотность во второй волне ДМ была примерно в 3 раза меньше зарегистрированной на I стадии наблюдений 27 июля.

Из анализа приведенных на рис. 3 распределений сечения и объема частиц по размерам следует, что на различных стадиях наблюдения дымовой мглы проявляются определенные устойчивые особенности динамики содержания среднedisперсных

и крупных частиц. Представляют интерес и эпизоды снижения замутнения, которые можно рассматривать как перемещение в периферийные (менее задымленные) пространственные зоны дымовых шлейфов.

Изменчивость содержания частиц средне- и крупнодисперсной фракций характеризуется сравнительно устойчивой динамикой, обусловленной процессами трансформации и рассеяния частиц ДМ в пространстве. Однако значения КПП всех фракций, и особенно микродисперсной, варьируют, слабо согласуясь с изменениями дисперсного состава. Так, например, мнимая часть КПП среднedisперсной фракции $\alpha_2(t)$ испытывает относительно небольшие вариации вблизи $\sim 0,01$, представляя собой умеренно поглощающие частицы. В то же время значения мнимой части КПП для крупнодисперсных частиц $\alpha_3(t)$ примерно в 1,5–2 раза выше величины $\alpha_2(t)$.

Фактически, при ослаблении мглы (перемещении в периферийные области дымовых шлейфов) уменьшение содержания среднedisперсной фракции сочетается не только с уменьшением оптического влияния умеренно поглощающих дымовых частиц. В таких условиях изменения ДМ отмечено пятикратное увеличение мнимой части КПП микродисперсной фракции $\alpha_1(t)$ до значений $\sim 0,5$, что ведет к убыванию величины альbedo однократного рассеяния $\omega(t)$ до значений $\sim 0,84$. Тот факт, что величина $\omega(t)$ заметно зависит от повышенного содержания сажевой компоненты в составе микродисперсной фракции, отмечался нами и ранее при анализе результатов дымовых экспериментов в БАК [3].

В [2–4] также было показано, что эффективность поглощения дымовых частиц зависит от режима термического разложения ЛГМ. В отличие от низкотемпературного пиролиза, в процессе высокотемпературного горения ЛГМ с пламенем генерируются большие концентрации сильнопоглощающих частиц микродисперсной фракции с $r < 150$ нм. Поскольку высота распространения продуктов термического разложения в атмосфере напрямую зависит от температуры (и эффективности конвективных процессов) [1, 10–12], то процессы смешения поглощающей микродисперсной фракции с более тяжелыми, умеренно поглощающими частицами среднedisперсной фракции ведут к проявлению неоднородности распределения указанных фракций по высоте и в пространстве. В этом, вероятно, и заключается причина несогласованного изменения количественных характеристик дисперсного состава ДМ и качественных признаков частиц, а именно значений их КПП.

Наряду с этим, оценки параметров дымовых частиц при распаде ДМ (в периферии дымового шлейфа) обнаружили неожиданное снижение значений реальной части КПП микродисперсной фракции $n_1(t)$ до значений $\sim 1,34$ (см. таблицу). Этот факт требует дополнительного исследования.

Несмотря на то что восстановленные спектры размеров достаточно динамичны по форме, а значения мнимой и действительной частей КПП существенно варьируют по интервалам дисперсности, проявляется тесная корреляционная связь между

объемными коэффициентами обратного рассеяния и ослабления (рис. 4), входящими как важные параметры в уравнение лазерной локации [13–16].

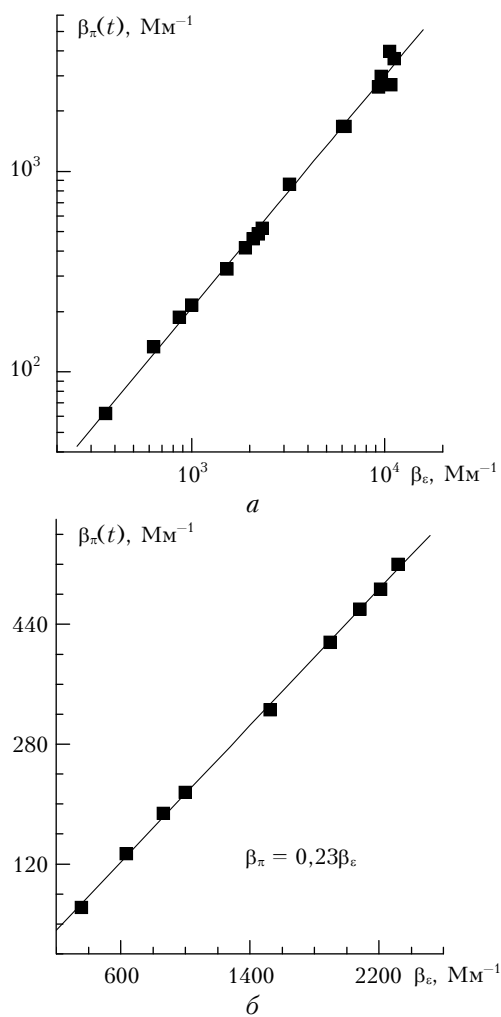


Рис. 4. Диаграммы корреляционной связи $\beta_{\pi}(t)$ и $\beta_{\epsilon}(t)$, рассчитанные по результатам обращения спектрофелометрических измерений: *a* – плотная дымовая мгла; *б* – стадия распада дымовой мгли

Отмеченный факт свидетельствует о том, что в плотной дымовой мгле следует ожидать применимости однопараметрической модели для описания связи оптических и микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля в задымленной атмосфере. Ранее подобная модель была развита для приземных атмосферных дымок [17, 18].

Представленная на рис. 4, *a* зависимость отмеченных параметров позволяет оценить их статистическую связь для условий плотной дымовой мгли в виде (коэффициент корреляции $R = 0,98$):

$$\beta_{\pi}(t) = 0,21\beta_{\epsilon}(t)^{1,16}.$$

Для периферии дымовых шлейфов (рис. 4, *б*) величина лидарного отношения оказалась постоянной ($b_{\pi} \sim 0,23$). Из этого факта следует важный вывод, что при распаде дымовой мгли взаимная изменчивость оптических характеристик фактически

определяется только вариациями счетной концентрации частиц, при которых значения нормированной индикатрисы локационного рассеяния остаются неизменными.

Определенная линейная связь с коэффициентом корреляции $\sim 0,55$ прослеживается в дымовой мгле и между вариациями альbedo однократного рассеяния $\omega(t)$ и среднеэффективным радиусом частиц $r_{\text{эф}}(t)$ (рис. 5).

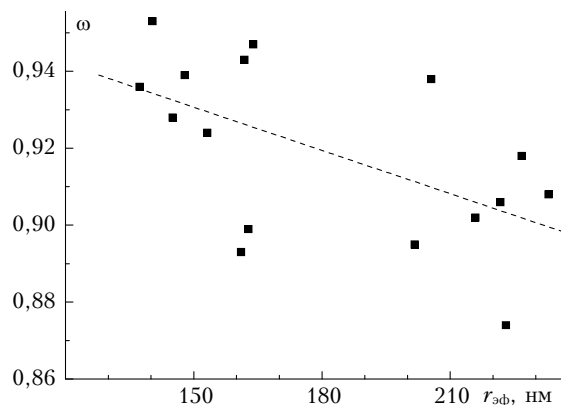


Рис. 5. Диаграммы корреляционной связи $\omega(t)$ и $r_{\text{эф}}(t)$, рассчитанные по результатам обращения спектрофелометрических измерений в дымовой мгле

Заключение

Результаты измерений в г. Томске с 27 июля по 14 августа 2012 г. спектральных значений поляризационных компонент коэффициента направленного аэрозольного рассеяния $\beta_s(t)$ показали, что в условиях поступления в регион измерений дымовой мгли обширных сибирских лесных пожаров достигались экстремальные уровни задымления приземного слоя воздуха. Значения метеорологической дальности видимости S_m в дымовой мгле снижались до 100 м, максимальная величина коэффициента направленного рассеяния на длине волны 525 нм под углом рассеяния 45° составляла $7500 \text{ Мм}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$.

Характерной особенностью плотного дымового смога лесных пожаров является преобладающее содержание частиц среднedisперсной фракции ($150 < r < 400 \text{ нм}$) с максимумом объемного распределения частиц около 350 нм.

По результатам обращения спектрофелометрических данных оценена изменчивость распределений объема и сечения частиц по размерам в дымовой мгле и получены данные о вариации эффективных значений КПП (реальной и мнимой частей) по трем интервалам дисперсности.

На основе информации о микрофизическом составе дыма проведена численная экстраполяция, и по теории Ми рассчитаны важные радиационно-значимые оптические характеристики дымового аэрозоля. Показано, что величина альbedo однократного рассеяния в видимой области спектра существенно зависит от поглощающих свойств микродисперсной фракции. Выявлена тесная корреляционная взаимосвязь объемных коэффициентов локационного

рассеяния $\beta_p(t)$ и ослабления $\beta_e(t)$. Оценены коэффициенты, определяющие степенную зависимость этих оптических параметров, а также характерное значение величины лидарного отношения.

Оценки показали, что на стадиях распада дымовой мглы (в периферийных областях дымовых шлейфов) уменьшается величина альбеда однократного рассеяния. В этих условиях также отмечены увеличение значений мнимой и снижение реальной частей КПП микродисперсной фракции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-12-00395).

1. Кондратьев К.Я., Григорьев Ал.А. Лесные пожары как компонент природной экодинамики // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17, № 4. С. 279–292.
2. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Оптические и микрофизические свойства пиролизного дыма по данным оптических измерений 4-волновым спектрофелометром // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 12. С. 1045–1053.
3. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Оптические и микрофизические свойства смешанного дыма по данным поляризационных спектрофелометрических измерений // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 1. С. 59–68.
4. Рахимов Р.Ф., Козлов В.С., Шмаргунов В.П. О временной динамике комплексного показателя преломления и микроструктуры частиц по данным спектрофелометрических измерений в смешанных дымах // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 887–897.
5. Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Тумаков А.Г., Панченко М.В., Рахимов Р.Ф. Угловой поляризационный спектрофелометр APSN-02 для изучения оптико-микрофизических свойств атмосферного субмикронного аэрозоля // Аэрозоли Сибири. XVIII Рабочая группа: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 2011. С. 78.
6. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В. Некоторые методические дополнения к решению обратной задачи для восстановления параметров дисперсной структуры дымов смешанного состава // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 3. С. 183–190.
7. Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П., Тумаков А.Г. Некоторые результаты измерений характеристик аэрозольного рассеяния поляризационным спектрофелометром // XIX Рабочая группа «Аэро-

золи Сибири»: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 2012. С. 18.

8. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Субмикронный аэрозоль и сажа приземного слоя в суточном ходе // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 561–568.
9. Яушева Е.П., Козлов В.С., Панченко М.В. Аномальные задымления приземного воздуха в Томске в период массовых лесных пожаров в июне–августе 2012 года // XIX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск: Изд-е ИОА СО РАН, 2012. С. 14.
10. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 237 с.
11. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
12. Самсонов Ю.Н., Беленко О.А., Иванов В.А. Дисперсные и морфологические характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 423–431.
13. Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э. Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным многочастотного лазерного зондирования. Часть 3. Спектральные особенности вертикального распределения оптических характеристик аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 216–223.
14. Бычков В.В., Пережогин А.С., Шевцов Б.М., Маричев В.Н., Матвиенко Г.Г., Белов А.С., Черемисин А.А. Лидарные наблюдения появления аэрозолей в средней атмосфере Камчатки в 2007–2011 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 87–93.
15. Матвиенко Г.Г., Погодаев В.А. Оптика атмосферы и океана – неоконченный урок взаимодействия оптического излучения со средой распространения // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 5–10.
16. Креков Г.М., Матвиенко Г.Г. Развитие лазерных технологий в проблеме дистанционного зондирования атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 10. С. 835–844.
17. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
18. Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В., Фадеев В.Я. Применение однопараметрической модели дымки в задачах лазерного зондирования // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 2. С. 25–32.

R.F. Rakhimov, V.S. Kozlov, M.V. Panchenko, A.G. Tumakov, V.P. Shmargunov. Properties of atmospheric aerosol in the plumes of forest fires according to the spectronephelometric measurements.

A cycle of measurements of the angular aerosol scattering coefficients under conditions of extremely dense smoke haze from Siberian forest fires has been carried out in Tomsk in July–August of 2012 with the aid of a polarization spectronephelometer. The size spectrum of the smoke haze had the ultra-fine (particle radius < 150 nm) and medium (with a mode of the volume distribution near 350 nm) fractions. The effective radius of particles was about 220 nm. The smoke haze was characterized by a weak absorption: the imaginary part of the refractive index of the ultra-fine and medium particles had values of ~0.038 and ~0.012, respectively. The mean value of the single scattering albedo at a wavelength of 525 nm was about 0.91.

At the “decay” of smoke haze (in peripheral zones of smoke plumes), the optical contribution from the ultra-fine fraction increases, which shows itself in the increase of the imaginary part of the refractive index of ultra-fine particles up to ~0.5 and a decrease of albedo from 0.91 to 0.84.