

Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужегов, Н.Н. Щелканов

АЭРОЗОЛЬНОЕ ОСЛАБЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЛЕТНИХ ДЫМКАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Рассматриваются результаты двух циклов измерений коэффициентов аэрозольного ослабления, проведенных вблизи г. Томска и в сельской местности в летний период. Выявлен высокий уровень аэрозольного ослабления в инфракрасной области спектра в условиях городской дымки. Предложена физическая интерпретация этого факта.

Показано, что усредненная спектральная зависимость коэффициентов аэрозольного ослабления в области длин волн 0,44–1,06 мкм в сельской дымке является более выраженной по сравнению с городской.

Отмечено сильное влияние относительной влажности воздуха на аэрозольное ослабление оптического излучения в фоновых условиях.

Одной из важнейших задач атмосферной оптики является изучение закономерностей аэрозольного ослабления видимого и инфракрасного излучения в приземных дымках различных регионов. Количественные данные о спектральных коэффициентах аэрозольного ослабления $\alpha(\lambda)$ в дымках необходимы, в частности, для повышения точности радиационных расчетов в климатологии, для улучшения алгоритмов обработки данных космического зондирования, а также для различных прикладных задач.

К настоящему времени статистически обеспеченные данные по коэффициентам $\alpha(\lambda)$ в летних дымках получены лишь для средних широт России [1–5], прибрежной зоны Черного моря [6–8] и аридной зоны, прилегающей к озеру Балхаш [9–11]. Проведенные исследования выявили принципиальные отличия оптических свойств дымок разных регионов, что лишнее раз подчеркивает необходимость регионального подхода в изучении приземных дымок. В этой связи представляется крайне важным провести подобные исследования в обширном регионе Западной Сибири, главной особенностью которого является наличие огромных лесных массивов и многочисленных болот.

Нужно заметить, что первый непродолжительный цикл комплексных исследований спектрального пропускания дымок в районе г. Томска был проведен еще в начале семидесятых годов в осенних условиях. Результаты исследований этого цикла позволили выявить значительное различие вещественного состава частиц мелко- и грубодисперсной фракций аэрозоля в приземных дымках и впервые из оптических данных обнаружить полосы поглощения аэрозоля в области длин волн 9–12 мкм [12].

Новый цикл исследований оптических свойств дымок Западной Сибири был начат в 1991 г. в рамках комплексной экологической программы по стратосферному и тропосферному озону (SATOR).

В данной статье обсуждаются результаты двух циклов измерений спектрального пропускания атмосферы, проведенных в 1992 г. Измерения проводились с помощью автоматизированного многоволнового измерителя спектральной прозрачности приземной атмосферы, подробное описание которого дано в [13]. Здесь можно лишь отметить, что данный прибор состоял из двух отдельных измерителей, конструктивно собранных на одном поворотном устройстве. Один из них работал в области длин волн 0,44–1,06 мкм (всего 8 участков спектра), а второй в области 1,06–12 мкм (15 участков спектра). В данном варианте оба измерителя работали по схеме с отражением. В качестве отражателя использовался один зеркальный катафот для обоих каналов.

Первый трехнедельный цикл круглосуточных измерений в диапазоне длин волн 0,44–12 мкм был проведен с 25 мая по 15 июня на трассе длиной 1 км в районе г. Томска. Второй, укороченный, цикл также круглосуточных измерений проводился с 17 по 23 июля в

80 км от г. Томска в условиях, близких к фоновым. Трасса длиной 1,2 км (с отражением) проходила над травянистым лугом в береговой черте реки Оби. Здесь по техническим причинам измерения проводились только в диапазоне длин волн 0,44–1,06 мкм.

В первый цикл измерений было получено 212 усредненных реализаций спектров коэффициентов общего ослабления, а во второй – 62. Отметим, что выделение коэффициентов аэрозольного ослабления $\alpha(\lambda)$ в ИК-области спектра осуществлялось статистическим методом [14]. Полученные коэффициенты $\alpha(\lambda)$ формировались в соответствующие массивы для первого и второго циклов измерений.

Для краткости изложения в дальнейшем будем считать, что измерения первого цикла были проведены в условиях городской дымки, а второго – сельской.

Результаты измерений

В табл. 1 приведены статистические характеристики массивов метеопараметров, которые имели место при измерениях первого и второго циклов. Здесь R – относительная влажность воздуха, e – парциальное давление паров воды, t – температура воздуха, \bar{X} – средние значения перечисленных параметров; σ_X – их среднеквадратические отклонения, P_{XX} – коэффициенты взаимной корреляции между метеопараметрами.

Таблица 1

Статистические характеристики метеопараметров в двух циклах измерений

X	Цикл 1					Цикл 2				
	\bar{X}	σ_X	P_{XX}			\bar{X}	σ_X	P_{XX}		
			R	e	t			R	e	t
$R, \%$	58,2	20,0	1,0	0,57	-0,47	81,9	13,84	1,0	-0,23	-0,85
$e, \text{мб}$	7,68	3,01	–	1,0	0,41	18,7	2,49	–	1,0	0,70
$t, \text{°C}$	10,8	5,33	–	–	1,0	19,8	3,97	–	–	1,0

Таблица 2

Статистические характеристики коэффициентов аэрозольного ослабления в летней городской дымке

$\lambda, \text{мкм}$	$\bar{\alpha}, \text{км}^{-1}$	$\sigma_{\alpha}, \text{км}^{-1}$	$P_{\alpha(0,44)\alpha(\lambda)}$	$P_{\alpha(1,06)\alpha(\lambda)}$	$P_{\alpha(\lambda)R}$	$P_{\alpha(\lambda)e}$	$P_{\alpha(\lambda)t}$
0,44	0,196	0,101	1,00	0,76	0,29	0,42	0,14
0,48	0,183	0,095	0,95	0,81	0,26	0,37	0,12
0,55	0,168	0,086	0,92	0,80	0,22	0,31	0,10
0,63	0,155	0,080	0,87	0,84	0,19	0,22	0,05
0,69	0,149	0,077	0,84	0,86	0,19	0,22	0,05
0,87	0,135	0,068	0,77	0,85	0,05	0,18	0,14
1,06	0,128	0,065	0,76	1,00	0,14	0,14	0,12
1,25	0,125	0,063	0,75	0,96	0,09	0,23	0,22
1,6	0,131	0,066	0,62	0,86	-0,04	0,17	0,32
2,2	0,123	0,062	0,59	0,82	-0,03	0,17	0,32
3,9	0,135	0,068	0,55	0,77	-0,053	0,20	0,36
4,6	0,161	0,080	0,54	0,67	-0,07	0,26	0,42
8,1	0,163	0,081	0,44	0,50	-0,014	0,31	0,50
8,6	0,146	0,073	0,49	0,59	-0,014	0,28	0,50
9,2	0,149	0,074	0,51	0,63	-0,013	0,27	0,49
9,5	0,163	0,081	0,53	0,72	-0,05	0,23	0,39
10,2	0,178	0,088	0,56	0,73	0,03	0,25	0,32
10,5	0,166	0,082	0,55	0,68	-0,03	0,26	0,39
11,1	0,162	0,081	0,55	0,67	-0,02	0,30	0,42
11,6	0,161	0,080	0,54	0,68	0,02	0,31	0,38
12,4	0,159	0,078	0,46	0,56	-0,14	0,29	0,53

Сопоставление данных табл. 1 показывает существенное различие метеорологических условий в первом и втором циклах измерений по всем параметрам. Видно, что во втором цикле средние значения температуры, относительной и абсолютной влажности воздуха были

значительно выше, чем в первом, при меньших значениях дисперсии. Это обстоятельство не позволяет строго выявить отличительные признаки городской и сельской дымки, поскольку измерения были проведены в существенно различных условиях. Помимо средних значений и дисперсий обсуждаемые периоды заметно различаются и по коэффициентам взаимной корреляции между метеопараметрами. Так, в частности, можно отметить сильную отрицательную корреляцию во втором цикле между относительной влажностью и температурой воздуха ($\rho_{Rt} = -0,85$) и сравнительно редко наблюдаемую отрицательную корреляцию между R и e ($\rho_{Re} = -0,23$).

Отмеченные особенности метеоусловий во время проведения измерений проявились и на оптических свойствах аэрозоля в первом и втором циклах исследований, что наглядно следует из табл. 2 и 3, в которых сведены статистические характеристики массивов коэффициентов аэрозольного ослабления $\alpha(\lambda)$ для городской и сельской летней дымки. Спектральная структура средних значений коэффициентов $\alpha(\lambda)$ для этих двух типов дымки показана на рис. 1.

Таблица 3

Статистические характеристики коэффициентов аэрозольного ослабления в летней сельской дымке

$\lambda, \text{мкм}$	$\bar{\alpha}, \text{км}^{-1}$	$\sigma_{\alpha}, \text{км}^{-1}$	$\rho_{\alpha(0,44)\alpha(\lambda)}$	$\rho_{\alpha(\lambda)R}$	$\rho_{\alpha(\lambda)e}$	$\rho_{\alpha(\lambda)T}$
0,44	0,258	0,166	1,00	0,51	-0,19	-0,45
0,48	0,262	0,168	0,95	0,56	-0,17	-0,48
0,55	0,217	0,139	0,94	0,56	-0,18	-0,48
0,63	0,199	0,127	0,93	0,58	-0,23	-0,52
0,69	0,186	0,119	0,93	0,57	-0,19	-0,50
0,87	0,157	0,100	0,88	0,54	-0,34	-0,56
1,06	0,149	0,095	-0,88	0,61	-0,36	-0,62

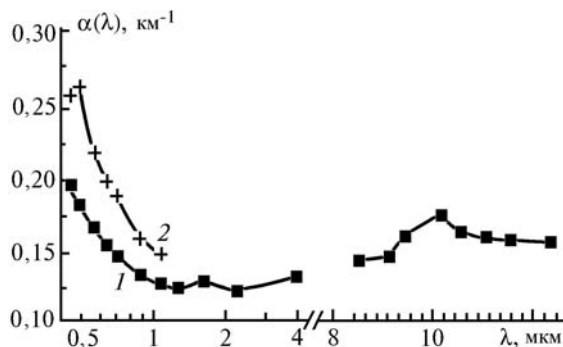


Рис. 1. Спектральная структура коэффициентов аэрозольного ослабления в условиях городской (1) и сельской (2) дымки

Городская дымка

Из анализа рис. 1 (кривая 1) и табл. 2 следует, что городская дымка характеризуется очень пологой спектральной зависимостью средних коэффициентов аэрозольного ослабления $\alpha(\lambda)$. Если условно принять уровень $\alpha = 0,125 \text{ км}^{-1}$ (при $\lambda = 1,25 \text{ мкм}$) за вклад в ослабление грубодисперсной фракцией частиц, то можно видеть, что на долю мелкодисперсного аэрозоля в области $\lambda = 0,44 \text{ мкм}$ приходится лишь $0,07 \text{ км}^{-1}$. По мере продвижения в сторону больших длин волн эта доля быстро уменьшается и становится незаметной уже при $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$.

Таким образом, можно сделать вывод, что в период измерений городская дымка характеризовалась дефицитом мелкодисперсного аэрозоля. Наиболее вероятной причиной данного дефицита является то, что значительная часть измерений этого цикла проводилась в условиях арктических воздушных масс. Кроме того, обращает на себя внимание очень высокий уровень коэффициентов $\alpha(\lambda)$ в ИК-области спектра (от $0,12$ до $0,18 \text{ км}^{-1}$), заметно превышающий известные средние данные по аэрозольному ослаблению в летних дымках средних широт ($0,05-0,10 \text{ км}^{-1}$) [1-5].

В общем случае такой уровень аэрозольного ослабления в ИК-области спектра может быть следствием систематической ошибки при выделении из общего ослабления аэрозольной компоненты, или же он обусловлен поглощением излучения частицами мелкодисперсной фракции или

ослаблением грубодисперсным аэрозолям. Поглощение мелкодисперсными частицами можно сразу исключить вследствие их малой концентрации (как было отмечено выше).

Для того чтобы из двух оставшихся факторов определить наиболее вероятный, рассмотрим помимо средних значений данные по коэффициентам автокорреляции между аэрозольным ослаблением на разных длинах волн и коэффициентам взаимной корреляции оптико-метеорологических параметров. Как видно из табл. 2, в городской дымке коэффициенты корреляции $\rho_{\alpha(0.44)\alpha(\lambda)}$ довольно быстро убывают с ростом длины волны до $\lambda = 4,6$ мкм, а затем остаются практически неизменными, варьируя от 0,50 до 0,55. Такое поведение параметра $\rho_{\alpha(0.44)\alpha(\lambda)}$ и его уровень свидетельствуют о существовании в атмосфере общего фактора, который обуславливает синхронные вариации аэрозольного ослабления в видимой и ИК-областях спектра. Нейтральный характер спектральной зависимости $\rho_{\alpha(0.44)\alpha(\lambda)}$ в ИК-диапазоне однозначно указывает на то, что этим фактором является существование в атмосфере гигантских частиц аэрозоля. В самом деле, если бы полученные величины коэффициентов $\alpha(\lambda)$ в ИК-области спектра были следствием систематической ошибки, то такого уровня корреляции с видимой областью спектра нам бы получить не удалось. К аналогичным выводам приводит и анализ спектральной структуры параметра $\rho_{\alpha(1.06)\alpha(\lambda)}$.

Как упоминалось выше, обычно средние значения коэффициентов аэрозольного ослабления в ИК-области спектра в дымках составляют $0,05-0,1 \text{ км}^{-1}$, а в нашем случае эта величина практически вдвое больше. Грубые оценки показывают, что полученное по нашим данным превышение уровня аэрозольного ослабления на $0,07-0,08 \text{ км}^{-1}$ может быть следствием рассеяния оптического излучения на частицах биологического происхождения (многочисленные пушинки тополя, осины, вербы, одуванчика и т.п.), которые в этот период почти постоянно присутствовали на измерительной трассе. В пользу этого предположения свидетельствует, в частности, характер спектральной зависимости корреляционной связи между коэффициентами аэрозольного ослабления и относительной влажностью воздуха $\rho_{\alpha(\lambda)R}$ (см. табл. 2).

Видно, что в области длин волн $0,44-1,25$ мкм корреляционная связь этих двух параметров положительная (хотя и очень слабая), а в области $\lambda \geq 1,6$ мкм она практически везде отрицательная. Сам факт появления отрицательной корреляции между α и R с позиции взаимодействия обычного аэрозоля с атмосферной влагой объяснить невозможно. Однако если предположить, что ослабление оптической радиации осуществляется летающими в воздухе пушинками, то отрицательную корреляцию между α и R в условиях периодически выпадающих дождей удастся интерпретировать. Действительно, во время дождя (когда относительная влажность воздуха, как правило, возрастает) пушинки намокают и их концентрация в воздухе уменьшается. А после дождя (когда влажность воздуха падает) пушинки обсыхают и их концентрация в воздухе постепенно растет. Поскольку во время первого цикла измерений дожди выпадали регулярно, то появление отрицательных значений $\rho_{\alpha(\lambda)R}$ в ИК-диапазоне длин волн представляется вполне закономерным. Нужно, однако, заметить, что указанный механизм, описывающий опосредованную связь концентрации пушинок с относительной влажностью воздуха, дает очень небольшой вклад в изменчивость $\alpha(\lambda)$ (см. уровень корреляции $\rho_{\alpha(\lambda)R}$ в табл. 2) и используется нами только для выявления тенденций.

Сельская дымка

Из анализа рис. 1 (кривая 2) и табл. 3 следует, что сельская дымка характеризуется более высокими значениями коэффициентов аэрозольного ослабления a в диапазоне длин волн $0,44-1,06$ мкм, а также более выраженной спектральной зависимостью $\alpha(\lambda)$ по сравнению с городской. По-видимому, эти отличия являются следствием не столько разных районов измерений, сколько существенно разными метеоусловиями этих измерений и прежде всего относительной влажностью воздуха R (см. табл. 1). Здесь уместно напомнить, что с ростом относительной влажности воздуха спектральная зависимость коэффициентов $\alpha(\lambda)$ в дымках становится более выраженной, а абсолютные значения $\alpha(\lambda)$ при этом возрастают во всем диапазоне длин волн [8].

Поскольку измерительная трасса проходила вблизи реки, то ночью и особенно утром несколько раз наблюдались туманы различной плотности. При этом относительная влажность воздуха довольно часто была выше 95% (в туманах 100%). Это приводило к тому, что конденсационные процессы на аэрозоле проявлялись очень активно. Последнее хорошо заметно на коэффициентах корреляции между $\alpha(\lambda)$ и R , которые изменяются от 0,51 до 0,61, что намного превышает соответствующие коэффициенты для городской дымки. Практически нейтральный характер коэффициентов корреляции $\rho_{\alpha(\lambda)R}$ во всем диапазоне длин волн приводит к тому, что наблюдается четко проявляющаяся синхронность изменения коэффициентов $\alpha(\lambda)$ на всех длинах волн и в полном соответствии с временной изменчивостью R . По-видимому, этот экспериментальный факт следует отнести к особенности именно сельской дымки, когда при отсутствии посторонних загрязнений природный аэрозоль разных размеров меняет свои оптико-физические свойства только в результате взаимодействия с атмосферной влагой.

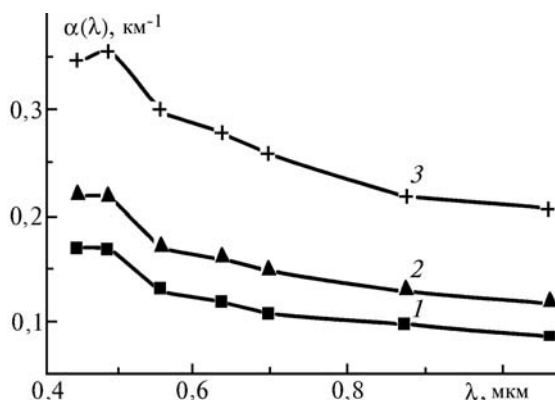


Рис. 2. Спектральная структура коэффициентов аэрозольного ослабления в сельской дымке при относительной влажности $R = 63$ (кривая 1), 80 (2) и 96% (3)

Анализ спектральной зависимости коэффициентов автокорреляции $\rho_{\alpha(0,44)\alpha(\lambda)}$ (табл. 3) показывает высокий уровень связи вариаций аэрозольного ослабления на всех длинах волн. Вероятней всего, что общим и очень сильным фактором синхронизации вариаций $\alpha(\lambda)$ здесь также является относительная влажность воздуха. Это предположение подтверждают, в частности, данные рис. 2, где приведены усредненные спектральные ходы коэффициентов аэрозольного ослабления в сельской дымке для трех значений относительной влажности воздуха. То обстоятельство, что с ростом влажности наблюдается сравнимый по величине рост коэффициентов аэрозольного ослабления (как в области длины волны 0,44 мкм, так и в районе 1,06 мкм), свидетельствует об адекватном влиянии влажности воздуха в сельской дымке на оптические свойства частиц разных размеров.

1. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. N 3. С. 257–265.
2. Филиппов В.Л., Мирумянц С.О. // Изв. вузов СССР. Физика. 1972. N 10. С. 103–106.
3. Малкевич М.С., Георгиевский Ю.С., Чавро А.И., Шукуров А.Х. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1977. Т. 13. N 12. С. 1257–1267.
4. Малкевич М.С., Георгиевский Ю.С., Чавро А.И., Шукуров А.Х. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. N 3. С. 273–284.
5. Парамонова Н.Н., Броунштейн А.М., Казакова К.В., Немец О.А. // Труды ГГО. 1984. N 472. С. 88–99.
6. Зуев В.Е., Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. N 12. С. 1268–1274.
7. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 6. С. 16–22.
8. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымков. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
9. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. N 4. С. 409–414.
10. Панченко М.В., Польшкин В.В., Пхалагов Ю.А., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 8. С. 905–912.
11. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 10. С. 1318–1329.

12. Андреев С. Д., Зуев В. Е., Ивлев Л. С., Кабанов М. В., Пхалагов Ю. А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1972. Т. 8. N 12. С. 1262–1267.
13. Пхалагов Ю. А., Ужegov В. Н., Щелканов Н. Н. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 667–671.
14. Пхалагов Ю. А., Ужegov В. Н. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 10. С. 3–11.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
26 января 1996 г.

Ju. A. Phkalagov, V. N. Uzhegov, N. N. Shchelkanov. Aerosol Attenuation of Optical Radiation in Sommer Hazes of West Siberia.

The results of two sets of measurement of aerosol attenuation coefficients conducted in the neighbourhood of Tomsk and in rural area in summer are treated in the paper. High level of aerosol attenuation within IR spectral range under urban haze is established. The physical interpretation of the phenomena is proposed.

It is shown that the averaged spectral dependence of the aerosol extinction coefficients within 0,44–1,0 μm wavelengths is more distinct for the rural haze than for the urban one. Strong influence of the air relative humidity on the optical radiation extinction under background conditions has been noticed.