

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

## СУТОЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ АЭРОЗОЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЫМКАХ АРИДНОЙ ЗОНЫ

На основе массива оптико-метеорологических параметров атмосферы аридного района проведен анализ суточной изменчивости коэффициентов аэрозольного ослабления в видимом и ИК-диапазонах длин волн для трех сезонов года (весна, лето, осень). Выявлено, что в дымках весны и осени наиболее выраженная изменчивость коэффициентов аэрозольного ослабления в суточном цикле отмечается только в видимом диапазоне длин волн, а в летних дымках во всем диапазоне длин волн от 0,44 до 4 мкм. Обсуждаются физические механизмы, формирующие суточную изменчивость аэрозольного ослабления в условиях аридного района.

Для понимания основных тенденций аэрозольного загрязнения атмосферы, для обоснования методологических аспектов построения оптических моделей атмосферы прогностического характера и других задач атмосферной оптики весьма важной представляется задача по выявлению разномасштабных процессов изменчивости коэффициентов аэрозольного ослабления  $\alpha(\lambda)$  в приземных дымках различных регионов. Решение такой задачи в рамках сезонной изменчивости было предпринято в нашей работе [1] для дымок аридной зоны на основе массива коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  и метеопараметров атмосферы, полученного в период 1984–1988 гг. в районе озера Балхаш. Отметим, что общий массив в [1] насчитывал 589 спектров коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  в диапазоне длин волн 0,44–11,5 мкм, из которых 230 было получено весной, 167 – летом и 192 – осенью. Анализ статистических характеристик данного массива позволил выявить существенную сезонную трансформацию спектров  $\alpha(\lambda)$ , обусловленную главным образом особенностями турбулентного выноса аэрозольных частиц разных размеров из приземного слоя в условиях аридной зоны [1].

Помимо сезонной трансформации спектров коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  представляют интерес исследования закономерностей изменчивости оптических параметров атмосферы в суточном цикле. Для изучения этого вопроса наиболее эффективным представляется подход, основанный на совместном анализе суточной изменчивости синхронно измеренных спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления в видимом и ИК-диапазоне длин волн и метеорологических параметров атмосферы.

В настоящей работе такой подход реализован на основе упомянутого выше массива коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  и метеопараметров, полученного в условиях аридной зоны [1]. Для этого внутри каждого сезонного массива были сформированы подмассивы, куда вошли только данные, полученные в режиме круглосуточных измерений. Затем были рассчитаны средние значения коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  во всем диапазоне длин волн и метеопараметров атмосферы для каждого срока измерений и соответствующие им дисперсии. Результаты расчетов коэффициентов аэрозольного ослабления в области длин волн  $\lambda = 0,55$  и  $3,97$  мкм, а также относительной влажности воздуха ( $R$ ), температуры воздуха ( $t$ ) и парциального давления паров воды ( $e$ ) для трех сезонов года представлены в табл. 1. Заметим, что усреднение данных для весенних дымок проведено за 27, для летних – за 17 и для осенних – за 19 суток.

Рассмотрим характер суточного цикла изменчивости параметров  $\alpha(0,55)$ ,  $\alpha(3,97)$ ,  $R$  и  $t$ , представив их в графическом виде отдельно для каждого сезона года. В основном будут анализироваться первые три параметра. Суточный ход температуры воздуха дается для того, чтобы иметь представление о температурном режиме внутри каждого сезона.

Таблица 1

**Суточная изменчивость средних значений и СКО коэффициентов  $\alpha(0,55)$ ,  $\alpha(3,97)$  и метеопараметров  $R$ ,  $t$  и  $e$  в атмосфере аридной зоны для трех сезонов года**

Время суток	$\alpha(0,55), \text{км}^{-1}$		$\alpha(3,97), \text{км}^{-1}$		$R, \%$		$t, ^\circ\text{C}$		$e, \text{мб}$	
	$\bar{\alpha}$	$\sigma_\alpha$	$\bar{\alpha}$	$\sigma_\alpha$	$\bar{R}$	$\sigma_R$	$\bar{t}$	$\sigma_t$	$\bar{e}$	$\sigma_e$
весна (апрель)										
01–15	0,095	0,047	0,033	0,015	81,4	1,83	4,73	3,44	7,26	2,85
03–45	0,106	0,051	0,030	0,010	85,6	1,51	3,70	3,21	7,03	2,30
07–00	0,110	0,042	0,036	0,011	84,1	1,82	2,80	3,43	6,53	2,21
10–00	0,090	0,040	0,031	0,013	72,3	1,42	5,80	4,12	6,86	2,37
12–30	0,077	0,035	0,027	0,013	61,5	1,64	8,11	4,26	6,78	2,23
15–15	0,077	0,042	0,026	0,011	60,6	1,68	9,80	3,95	7,38	2,28
17–45	0,082	0,063	0,025	0,015	58,3	1,70	8,50	3,49	6,50	2,03
20–15	0,089	0,054	0,026	0,011	66,8	1,91	6,20	3,59	6,39	1,64
22–45	0,083	0,039	0,029	0,013	78,1	2,34	5,68	3,96	7,26	2,44
лето (июль)										
01–15	0,061	0,013	0,070	0,029	47,7	1,43	25,4	3,37	15,4	4,74
03–45	0,071	0,038	0,079	0,055	55,2	1,95	23,4	3,56	16,2	4,29
07–00	0,065	0,026	0,073	0,036	56,1	1,83	23,6	3,40	16,1	3,34
10–00	0,055	0,022	0,064	0,028	49,8	1,18	25,6	3,33	16,6	4,64
12–30	0,057	0,025	0,058	0,022	47,0	1,11	25,9	3,88	16,5	5,81
15–15	0,049	0,028	0,056	0,025	38,4	0,98	28,4	3,71	15,0	4,73
17–45	0,043	0,018	0,051	0,022	36,5	0,84	29,4	4,05	15,0	4,69
20–15	0,054	0,020	0,060	0,025	37,4	1,14	29,6	3,77	15,4	5,24
22–45	0,054	0,018	0,064	0,024	44,6	0,86	26,8	3,26	15,4	4,31
осень (октябрь)										
01–15	0,067	0,037	0,039	0,028	78,8	1,54	1,29	4,35	5,57	1,75
03–15	0,068	0,050	0,037	0,025	82,9	1,60	0,93	3,10	5,52	1,24
07–00	0,071	0,044	0,038	0,024	84,2	1,49	1,54	2,21	5,84	1,22
10–00	0,058	0,028	0,036	0,016	70,8	2,29	6,41	2,18	6,82	1,37
12–30	0,053	0,018	0,035	0,018	67,4	2,70	7,17	3,09	6,79	1,61
15–15	0,046	0,029	0,034	0,017	59,7	2,54	7,79	2,84	6,28	1,20
17–45	0,050	0,029	0,043	0,021	66,1	2,56	6,01	2,38	6,19	1,19
20–15	0,054	0,028	0,042	0,026	70,7	2,18	3,85	3,11	5,78	1,51
22–45	0,063	0,035	0,052	0,041	74,4	2,03	2,88	3,03	5,73	1,57

### Весна

На рис. 1 приведены суточные ходы указанных выше параметров для весенних условий. Видно, что в весенний период наблюдается хорошее соответствие суточного хода коэффициентов аэрозольного ослабления в видимой области спектра  $\alpha(0,55)$  и относительной влажности воздуха  $R$  с максимумом в 7 и минимумом в 15 ч. Заметим, что тенденция суточной изменчивости коэффициентов  $\alpha(3,97)$  в общем также подобна изменению  $R$  с вероятностью отличия средних значений для утренних и дневных условий по  $t$ -критерию более 99%.

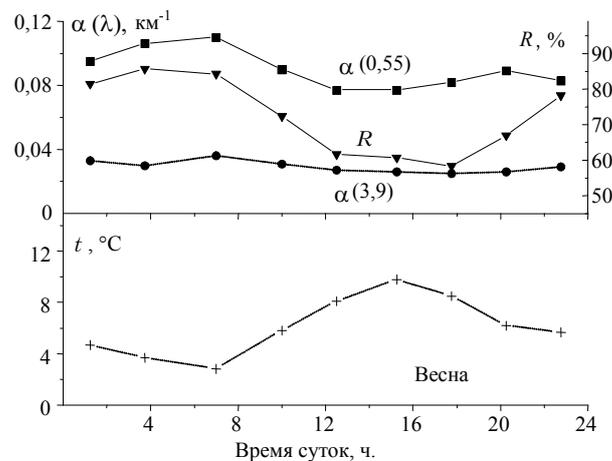


Рис. 1. Среднесуточная изменчивость коэффициентов аэрозольного ослабления  $\alpha(0,55)$  и  $\alpha(3,97)$ , относительной влажности воздуха  $R$  и температуры  $t$  в аридной зоне в весенний период

На этом основании формально можно предположить, что в весенний период в аридной зоне основная доля вариаций аэрозольного ослабления как в видимой, так и в ИК-области длин волн обусловлена суточным циклом изменчивости относительной влажности воздуха. Однако нужно заметить, что в общем случае вследствие взаимообусловленности метеопараметров наблюдаемая связь  $\alpha(\lambda)$  с  $R$  может оказаться опосредованной через третий параметр. В качестве такового может выступать, например, парциальное давление паров воды ( $e$ ), когда имеют место синхронные вариации содержания паров воды и мелких аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы [2, 3]. Тогда за счет существования взаимной корреляции между  $R$  и  $e$  будет наблюдаться и корреляция между  $\alpha(\lambda)$  и  $R$ .

Для того чтобы исключить ошибку в интерпретации данных в подобных случаях следует рассматривать частные коэффициенты корреляции  $\rho_{\alpha(\lambda)R/e}$ , т.е. корреляцию между  $\alpha$  и  $R$  при фиксированном значении  $e$  [4]. Сводка полных и частных коэффициентов корреляции между  $\alpha(\lambda)$  и  $R$  рассматриваемого массива для двух длин волн дана в табл. 2. Заметим, что для данного массива уровень значимой корреляции составляет 0,15.

Таблица 2

Полные и частные коэффициенты корреляции между  $\alpha(\lambda)$  и  $R$  в аридной зоне

Сезон года	$\lambda = 0,55$ мкм		$\lambda = 3,97$ мкм	
	$\rho_{\alpha\lambda R}$	$\rho_{\alpha\lambda R/e}$	$\rho_{\alpha\lambda R}$	$\rho_{\alpha\lambda R/e}$
Весна	0,38	0,56	-0,08	-0,03
Лето	0,19	-0,02	0,23	0,16
Осень	0,46	0,37	0,21	0,05

Из таблицы видно, что весной наблюдается значимая корреляция между  $\alpha(0,55)$  и  $R$  как для полных, так и для частных коэффициентов корреляции. Такой факт свидетельствует о значительном влиянии относительной влажности воздуха на аэрозольное ослабление в этом диапазоне длин волн. В то же время полное отсутствие корреляции между  $\alpha(3,97)$  и  $R$  говорит о том, что наблюдаемая на рис. 1 суточная изменчивость  $\alpha(3,97)$  ничего общего с влажностью не имеет и обусловлена, по всей вероятности, вариациями концентрации грубодисперсного аэрозоля в приземном слое. Рассматривая эти два механизма в качестве основных, важно выяснить их вклад в разных участках спектра. Для этого проанализируем данные рис. 2, где приведены усредненные спектры коэффициентов  $\bar{\alpha}(\lambda)$  в диапазоне  $\lambda = 0,44 \div 4$  мкм для дневных (кривая 1,  $R = 61\%$ ) и утренних (кривая 2,  $R = 84\%$ ) условий. По характеру трансформации спектров можно заключить, что относительная влажность воздуха наиболее заметно проявляется лишь в области длин волн 0,44–1,25 мкм, обуславливая изменение состояния субмикронного аэрозоля. В остальной части спектра наблюдается практически параллельное смещение кривой 2 относительно кривой 1, которое, вероятно, можно объяснить как ростом частиц грубодисперсного аэрозоля, связанного с относительной влажностью воздуха, так и увеличением концентрации грубодисперсного аэрозоля в утренние часы.

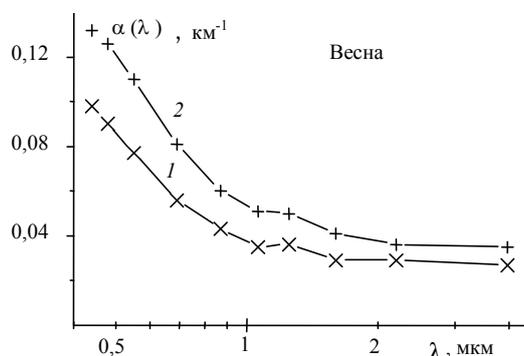


Рис. 2. Усредненные спектральные зависимости коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  в весенних дымках для дневных (1) и утренних (2) условий

## Лето

Для летних условий (рис. 3) характер суточной изменчивости оптико-метеорологических параметров становится несколько иным. Видна выраженная синхронность суточного хода трех параметров  $\alpha(0,55)$ ,  $\alpha(3,97)$  и  $R$  с максимумом в 4 ч и минимумом в 18 ч. При этом уровень коэффициентов  $\alpha(3,97)$  оказывается выше, чем в видимом диапазоне.

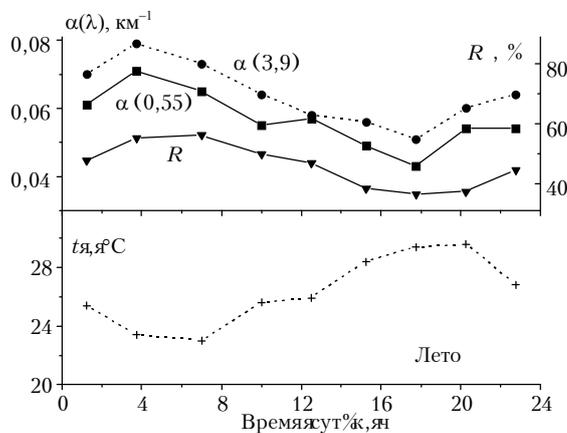


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но для летнего периода

На первый взгляд кажется естественным объяснить суточную изменчивость коэффициентов аэрозольного ослабления как в видимой, так и в ИК-области спектра влиянием относительной влажности воздуха. Однако низкий уровень и малая амплитуда вариаций последней ( $R = 36 \div 56\%$ ), с одной стороны, и слабая корреляция  $\alpha$  с  $R$  ( $\rho_{\alpha_{0,55} R/e} = -0,02$ ,  $\rho_{\alpha_{3,97} R/e} = 0,16$ ) – с другой, заставляют усомниться в этом, казалось бы очевидном, выводе. По-видимому, синхронность суточной изменчивости  $\alpha(0,55)$ ,  $\alpha(3,97)$  и  $R$ , представленная на рис. 3, является следствием совпадения временного хода двух разных процессов, не связанных между собой непосредственно. Поэтому для объяснения выявленных закономерностей необходимо привлекать иные физические механизмы, которые могут наблюдаться в данном регионе. Проанализируем с этих позиций данные рис. 3.

Хорошая временная синхронность коэффициентов  $\alpha(0,55)$  и  $\alpha(3,97)$ , а также близость их абсолютных значений свидетельствуют, что в формировании спектральной структуры аэрозольного ослабления в летний сезон преобладает грубодисперсный аэрозоль. Характер же суточной изменчивости коэффициентов аэрозольного ослабления на фоне очень низкой относительной влажности воздуха указывает на то, что в летний период в аридной зоне действуют физические механизмы, способствующие накоплению грубодисперсного аэрозоля в приземном слое воздуха ранним утром и уменьшению его концентрации в дневное время.

Это предположение подтверждают данные рис. 4, где представлены усредненные спектральные зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления для дневных (кривая 1) и ночных (2) условий в летней дымке. Практически параллельный сдвиг кривой 2 по отношению к кривой 1 свидетельствует о том, что рост коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  в ночное время обусловлен увеличением концентрации именно грубодисперсной фракции аэрозоля.

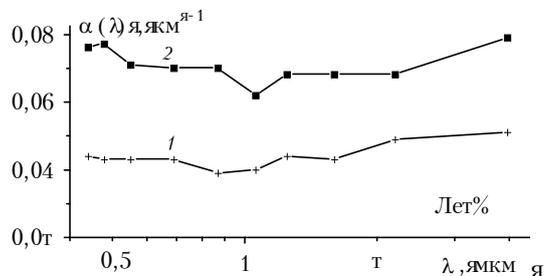


Рис. 4. Усредненные спектральные зависимости коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  в летних дымках для дневных (1) и ночных (2) условий

В качестве основного механизма, приводящего к уменьшению концентрации грубодисперсного аэрозоля в приземном слое в дневное время, по-видимому, является его вынос в вышележащие слои атмосферы за счет конвекции и турбулентной диффузии, которые, по оценкам [5], в аридной зоне значительно мощнее, чем в других зонах. В рамках этого механизма существование дневного минимума в суточном ходе коэффициентов  $\alpha(0,55)$  и  $\alpha(3,97)$  является вполне логичным, поскольку в это время (15–18 ч) реализуется максимальный прогрев подстилающей поверхности и происходит наиболее интенсивный вынос аэрозоля из приземного слоя.

Значительно сложнее дать однозначную физическую интерпретацию утреннего максимума концентрации грубодисперсных частиц в приземном слое атмосферы. В качестве одного из механизмов накопления этих частиц можно рассматривать седиментационное осаждение аэрозоля из вышележащих слоев при отсутствии восходящих потоков (после захода солнца). Скорость оседания частиц в этом случае определяется сопротивлением воздуха. Сила сопротивления воздуха  $F$  при движении частицы радиусом  $r$  со скоростью  $V$  равна [6]

$$F = 6\pi\eta rV, \quad (1)$$

где  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения или вязкость среды, Па·с. Соответственно выражение для силы тяжести имеет вид

$$G = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 g (\rho - \rho_v), \quad (2)$$

где  $m$  – масса частицы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho$  и  $\rho_v$  – плотность вещества частицы и воздуха соответственно.

Скорость равномерного оседания частиц в воздухе под действием силы тяжести может быть определена из условия равенства этих сил ( $F=G$ )

$$V = \frac{2}{9}gr^2(\rho - \rho_v)\eta^{-1}. \quad (3)$$

Оценки, проведенные по (3) для  $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$ , показывают, что частицы радиусом  $r = 1; 3; 5$  и  $10 \text{ мкм}$  оседают со скоростью  $0,70; 6,1; 17,3$  и  $68 \text{ м/ч}$  соответственно.

Если предположить, что в аридной зоне в летний день в слое перемешивания (до высоты  $\sim 1 \text{ км}$ ) аэрозоль распределен равномерно, то различие в скорости оседания частиц может приводить к накоплению в приземном слое грубодисперсных частиц в случае, когда имеется механизм, ограничивающий сухое осаждение частиц на подстилающую поверхность (например, турбулентные вихри в приземном слое атмосферы). Кроме этой гипотезы может рассматриваться случай неравномерного распределения грубодисперсного аэрозоля по высоте с максимумом концентрации на высоте  $500\text{--}600 \text{ м}$ . Тогда при отсутствии восходящих потоков аэрозоль из этого слоя будет оседать в приземный слой и достигнет максимальной концентрации в утренние часы. Можно также рассматривать возможность накопления аэрозоля в нижнем слое атмосферы, связанную с уменьшением слоя перемешивания в ночное время и т.п. Однако однозначные выводы по данному вопросу на основании имеющихся экспериментальных данных сделать невозможно.

## Осень

Характер суточной изменчивости рассматриваемых параметров для осенних условий представлен на рис. 5, где, так же как и для других сезонов, можно отметить хорошую синхронность суточного хода коэффициентов  $\alpha(0,55)$  и относительной влажности воздуха с максимумом в 7 ч и минимумом в 15 ч. Достаточно высокий уровень и большой диапазон вариаций  $R$  (от 84 утром до 59% днем), а также значимая корреляция  $\alpha(0,55)$  с  $R$  (см. табл. 2) позволяют предположить, что в осенний период, так же как и весной, основным фактором, формирующим суточную изменчивость коэффициентов аэрозольного ослабления в видимой области спектра, является относительная влажность воздуха. Этот вывод подтверждают и данные рис. 6, где приведены спектры коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  в осенних дымках для дневных (кривая 1) и утренних (2) условий. Видно, что основная трансформация спектральной структуры  $\alpha(\lambda)$  имеет место в диапазоне длин волн  $0,44\text{--}1,2 \text{ мкм}$ , а характер трансформации является типичным для случая, когда главным фактором изменчивости аэрозольного ослабления является

относительная влажность воздуха. Следует отметить также, что коэффициенты  $\alpha(3,97)$  в осенних дымках имеют ночной максимум приблизительно в 23 ч (см. рис. 5).

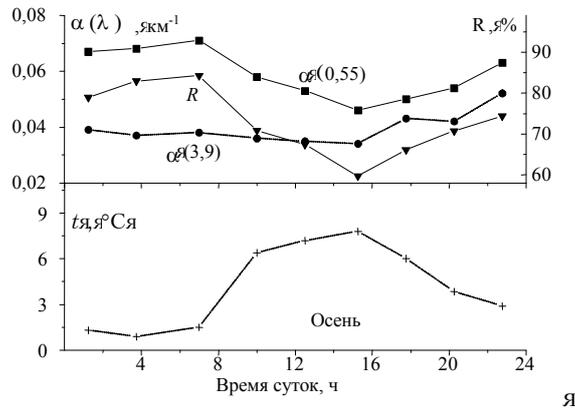


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, но для осеннего периода

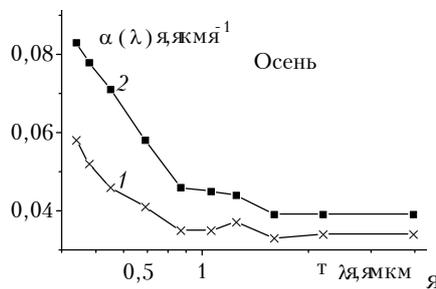


Рис. 6. Усредненные спектры коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  для дневных (1) и утренних (2) условий в осенних дымках

Резюмируя проанализированные данные, можно отметить следующее:

– в весенних и осенних дымках аридного района наиболее выраженная суточная изменчивость коэффициентов аэрозольного ослабления с максимумом в 7 ч и минимумом в 15 ч отмечается в видимой области спектра и обусловлена суточными вариациями относительной влажности воздуха. В инфракрасном диапазоне изменение коэффициентов  $\alpha(\lambda)$  в течение суток выражено значительно слабее;

– в летних дымках аридной зоны наблюдается отчетливый суточный ход коэффициентов аэрозольного ослабления во всем диапазоне длин волн с максимумом в 4 ч и минимумом в 18 ч, обусловленный суточной изменчивостью концентрации грубодисперсного аэрозоля.

По средним оценкам уровень аэрозольного ослабления в суточном цикле для весенне-осенних дымок максимально изменяется в 1,4 раза, для летних – в 1,6 раза.

1. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 10. С. 1318–1329.
2. Сидоров В.Н. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. N 5. С. 555–558.
3. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымков/ М.В. Кабанов, М.В. Панченко, Ю.А. Пхалагов и др. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
4. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
5. Белан Б.Д., Задде Г.О., Пхалагов Ю.А., Рассказчикова Т.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. N 6. С. 622–628.
6. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1980. 208 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
8 декабря 1995 г.

Ju.A. Pkhalagov, V.N. Uzhegov, N.N. Shchelkanov. **Diurnal Variability of Aerosol Attenuation of the Optical Emission in Hazes of Arid Zone.**

The analysis of the diurnal variability of the aerosol attenuation coefficients was conducted for three seasons (spring, summer, autumn) based on a bulk of optical-meteorological atmospheric parameters of an arid zone for the visible and IR ranges of wavelength. The most distinct diurnal variability of the aerosol attenuation coefficients was remarked for the spring and autumn hazes in the visible range, and for the summer haze within the whole wavelength range from 0.44 to 4.0  $\mu\text{m}$ . The physical mechanisms responsible for the diurnal variability of the aerosol attenuation in the arid zone are discussed.