

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.521.3

**Взаимосвязь вариаций аэрозольного ослабления видимой
и ИК-радиации приземного слоя воздуха
и всей атмосферной толщи**

В.Н. Ужегов, Д.М. Кабанов, Ю.А. Пхалагов, С.М. Сакерин*

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

Поступила в редакцию 21.10.2008 г.

Проведена статистическая обработка массивов спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления в приземном слое воздуха $\beta(\lambda)$ и аэрозольной оптической толщи атмосферы $\tau(\lambda)$ в диапазоне длин волн $\lambda = 0,44 \div 4,0$ мкм, полученных в районе г. Томска в 2003–2005 гг. Обнаружено, что максимальный уровень взаимной корреляции между вариациями $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ наблюдался в массиве 2003 г. в условиях повышенной задымленности атмосферы. Показано, что это может быть связано с увеличением диапазона изменчивости аэрозольного ослабления излучения как на приземной трассе, так и по всей толще атмосферы во время прихода в район измерений дымовых образований. Для более чистых условий 2004 и 2005 гг. коэффициенты взаимной корреляции $\rho_{\beta\tau}(\lambda)$ оказываются значительно ниже. Проведенный расчет собственных векторов объединенной автокорреляционной матрицы $\{\beta_i(\lambda), \tau_i(\lambda)\}$ показал, что уменьшение взаимной корреляции между вариациями $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ может быть связано с процессом выноса частиц конвективными и турбулентными потоками, в результате чего идет накопление аэрозоля по толще за счет обеднения приземного слоя атмосферы. Возможен также обратный процесс, связанный с осаждением аэрозоля.

Ключевые слова: натурный эксперимент, коэффициент аэрозольного ослабления, аэрозольная оптическая толщина атмосферы, статистика.

Введение

Исследование взаимосвязи вариаций одновременно измеренных коэффициентов аэрозольного ослабления на приземной трассе $\beta(\lambda)$ и аэрозольной оптической толщи атмосферы $\tau(\lambda)$ в широком диапазоне длин волн является одной из интересных и практически важных задач атмосферной оптики. В частности, результаты таких исследований в разных регионах и метеорологических условиях могут быть использованы для разработки эмпирической модели восстановления аэрозольной оптической толщи атмосферы по известному значению аэрозольного ослабления в приземном слое. Такая модель будет полезна при радиационных расчетах, когда нет прямых измерений аэрозольной оптической толщи. Кроме того, проведение синхронных измерений параметров $\tau(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ позволяет оценить эффективную высоту однородной аэрозольной атмосферы в разных спектральных участках, определяемую из соотношения $H_0(\lambda) = \tau(\lambda) / \beta(\lambda)$ и характеризующую высоту слоя перемешивания для частиц разных размеров. Это означает, что пара-

метр $H_0(\lambda)$ можно использовать для изучения динамики слоя перемешивания как для мелких, так и для крупных частиц при различных метеорологических условиях и состояниях подстилающей поверхности.

Следует заметить, что для исследования динамики слоя перемешивания аэрозоля можно использовать лазерное зондирование атмосферы [1, 2]. Достоинствами его являются оперативность получения данных и высокое пространственное разрешение, а недостаток – слабая информативность спектрального диапазона, в котором работает большинство лазерных локаторов (чаще всего одна длина волны). Такая ограниченность спектрального диапазона не позволяет получать информацию об оптических свойствах частиц разного диапазона размеров.

Имеющиеся исследования, в которых проводились одновременные измерения параметров $\tau(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$, в большинстве случаев обнаруживают весьма слабую корреляционную связь между этими характеристиками атмосферы (см. краткий обзор в [3], а также работы [4, 5]). В связи с этим представляет интерес выявить основные факторы, уменьшающие корреляцию между $\tau(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$, и попытаться найти условия, внутри которых связь между этими параметрами будет достаточно тесной. Такие попытки были предприняты в [3, 6], где измерения $\tau(\lambda)$

* Виктор Николаевич Ужегов (uzhegov@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Юрий Александрович Пхалагов (pkhalagov@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru).

и $\beta(\lambda)$ осуществлялись в диапазоне длин волн 0,44–1,06 мкм. Для обработки использовались данные, полученные в теплые сезоны 1995–2000 гг. в районе г. Томска. Общий массив насчитывал 144 реализации.

Было показано, что в общем случае в летних условиях корреляция между параметрами $\tau(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ максимальна в видимой области спектра и составляет $\sim 0,37$ при уровне значимости 0,15. Было высказано предположение, что первопричиной такой слабой взаимосвязи этих характеристик является разный оптический вклад в $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ субмикронных и грубодисперсных частиц, временные вариации которых часто обусловлены разными факторами.

Для уменьшения вклада грубодисперсного аэрозоля было проведено разделение параметров $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ на мелко- и грубодисперсную компоненты и проанализирована взаимосвязь только мелкодисперсных составляющих. Однако оказалось, что и в этом случае ожидаемого увеличения корреляции не происходит.

В работе [6] исследовалась дневная изменчивость параметров $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ в летние сезоны. Было обнаружено, что в приземном слое атмосферы величина $\beta(\lambda)$ с 06 до 18 ч в целом непрерывно возрастает во всем диапазоне длин волн (от 0,44 до 1,06 мкм). Что касается параметра $\tau(\lambda)$, то в видимом диапазоне длин волн он также растет с 06 до 18 ч, а в области $\lambda = 1,06$ мкм в его дневном ходе довольно часто наблюдается максимум в районе 12 ч с последующим спадом (вплоть до 18 ч). Предполагается, что такой характер временной динамики параметров $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$, связанный, вероятно, с конвективным выносом и гравитационным осаждением грубодисперсных частиц, является одним из факторов, ослабляющих их взаимную корреляцию.

Настоящая статья является продолжением исследований, начатых в [3, 6], но в более широком диапазоне длин волн ($\lambda = 0,44 \div 4,0$ мкм). Целью работы по-прежнему являются выявление и количественная оценка факторов, которые обуславливают коррелированную и некоррелированную изменчивость аэрозольного ослабления оптического излучения на приземных трассах и по всей толще атмосферы.

Характеристика исходных данных

Анализировались результаты одновременных измерений параметров $\tau(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$, проводившихся в районе г. Томска в 2003–2005 гг. Измерения велись в дневное время суток, что обусловлено спецификой работы солнечного фотометра. Конкретные периоды проведения измерений по годам и общая статистика полученных данных с указанием количества дымовых ситуаций (вероятно, связанных с удаленными лесными пожарами), приведены в табл. 1.

Таблица 1

Объем полученного материала

Год	Период измерений	Число измерительных дней	Общее количество реализаций	Количество дымовых ситуаций	Процент дымовых ситуаций
2003	июль–октябрь	70	480	98	20,4
	май–октябрь				
2004	май–октябрь	66	398	34	8,5
	май–сентябрь				
2005	май–сентябрь	109	650	41	6,3

Заметим, что идентификация дымовых ситуаций проводилась как визуально, так и на основе анализа спектральных зависимостей $\beta(\lambda)$, полученных из измерений в приземной атмосфере.

Диапазон изменчивости метеорологических условий во время проведения оптических измерений по годам приведен в табл. 2, где t – температура воздуха; Rh – относительная влажность воздуха; P – атмосферное давление; e – парциальное давление паров воды; V – скорость ветра; ω – осажденный слой паров воды по вертикали; S_m – метеорологическая дальность видимости. Величина ω находилась из измерений оптической толщи атмосферы в полосе поглощения воды при $\lambda = 0,94$ мкм, а значения S_m рассчитывались из соотношения $S_m = 3,91/\beta(0,55)$, где $\beta(0,55)$ – коэффициент аэрозольного ослабления излучения в области $\lambda = 0,55$ мкм в приземном слое. Большой диапазон изменчивости метеопараметров в каждом измерительном периоде и близость средних значений свидетельствуют о статистической обеспеченности полученных массивов.

Таблица 2

Метеорологические условия наблюдений

Измеряемый параметр (X)	2003 г.				2004 г.				2005 г.			
	\bar{X}	σ_X	X_{\min}	X_{\max}	\bar{X}	σ_X	X_{\min}	X_{\max}	\bar{X}	σ_X	X_{\min}	X_{\max}
t , °C	18,4	6,8	–5,8	28,7	19,7	6,3	–1,0	32,1	18,3	7,4	–4,6	31,8
Rh , %	53,1	15,9	24,6	96,5	51,9	16,7	19,9	95,8	51,5	16,3	20,0	92,0
P , мм рт. ст.	749,2	6,3	735	768	747,0	5,9	735	765	745,5	6,1	729	759
e , мбар	11,3	3,4	2,7	18,2	11,7	3,2	3,90	19,1	11,4	5,0	2,8	23,9
V , м/с	2,00	0,93	0,1	5,0	2,0	0,9	0,09	6,2	2,0	1,0	0	8,2
ω , см	1,66	0,52	0,38	2,84	1,62	0,49	0,45	2,72	1,54	0,77	0,29	3,44
S_m , км	20,7	7,8	4	55	16,8	6,1	7	45	21,9	9,9	5	95

Основные результаты

В результате статистической обработки данных по каждому году были получены средние значения и среднеквадратические отклонения параметров $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Средние значения коэффициентов $\beta(\lambda)$, $\tau(\lambda)$ и их среднеквадратические отклонения $\sigma_\beta(\lambda)$ в измерительные сезоны 2003–2005 гг.

λ , мкм	2003 г.		2004 г.		2005 г.	
	$\beta(\lambda)$	$\sigma_\beta(\lambda)$	$\beta(\lambda)$	$\sigma_\beta(\lambda)$	$\beta(\lambda)$	$\sigma_\beta(\lambda)$
0,45	0,274	0,186	0,284	0,103	0,267	0,111
0,50	0,259	0,171	0,273	0,089	0,233	0,095
0,55	0,248	0,159	0,259	0,081	0,209	0,084
0,69	0,232	0,143	0,225	0,067	0,168	0,068
0,87	0,185	0,106	0,206	0,061	0,141	0,058
1,06	0,143	0,071	0,194	0,059	0,132	0,052
1,60	0,101	0,044	0,162	0,050	0,126	0,050
2,17	0,083	0,035	0,149	0,051	0,109	0,047
3,91	0,075	0,034	0,138	0,047	0,110	0,049
λ , мкм	$\bar{\tau}(\lambda)$	$\sigma_\tau(\lambda)$	$\bar{\tau}(\lambda)$	$\sigma_\tau(\lambda)$	$\bar{\tau}(\lambda)$	$\sigma_\tau(\lambda)$
0,45	0,21	0,144	0,198	0,118	0,188	0,106
0,50	0,19	0,131	0,177	0,104	0,166	0,094
0,55	0,177	0,122	0,165	0,096	0,154	0,088
0,69	0,155	0,106	0,143	0,082	0,137	0,077
0,87	0,108	0,075	0,106	0,058	0,094	0,053
1,06	0,075	0,05	0,079	0,041	0,065	0,036
1,25	0,059	0,037	0,062	0,035	0,051	0,029
1,60	0,05	0,03	0,064	0,036	0,049	0,028
2,17	0,045	0,028	0,061	0,036	0,048	0,027
4,0	0,044	0,026	0,064	0,037	0,047	0,032

Для наглядности эти данные приведены на рис. 1.

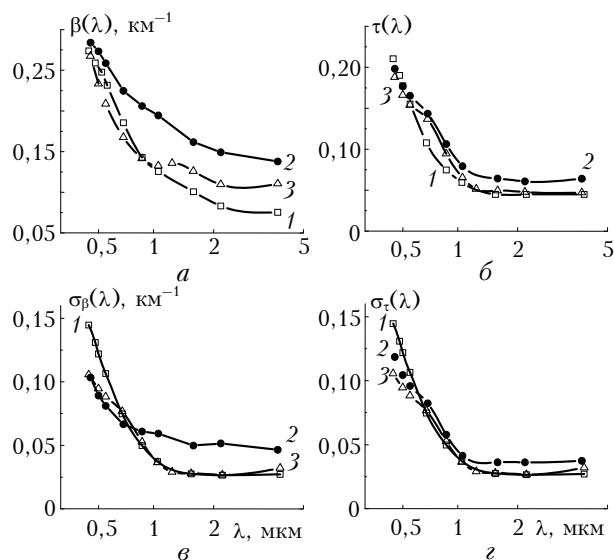


Рис. 1. Усредненные спектральные зависимости коэффициентов аэрозольного ослабления β (а) и аэрозольной оптической толщи атмосферы τ (б) в районе г. Томска за 2003, 2004 и 2005 гг. (кривые 1, 2 и 3 соответственно); σ_β и σ_τ – среднеквадратические отклонения вариаций β и τ

Видно, что кривые $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ 2003 г., когда отмечалась повышенная задымленность, являются наиболее гладкими и характеризуются минималь-

ными значениями аэрозольного ослабления в ИК-области спектра. Последнее, вероятно, связано с ослаблением конвективного выноса крупных частиц с подстилающей поверхности вследствие уменьшения радиационного прогрева почвы в условиях задымленной атмосферы [7]. Для более чистых измерительных сезонов 2004 и 2005 гг. заметно проявляется немонотонность спектральных зависимостей β и τ и наблюдаются повышенные значения аэрозольного ослабления в ИК-области спектра (особенно в приземном слое атмосферы).

По имеющимся массивам $\{\tau_i(\lambda)\}$ и $\{\beta_i(\lambda)\}$ были рассчитаны автокорреляционные матрицы $\rho[\beta(\lambda_i), \beta(\lambda_j)]$ и $\rho[\tau(\lambda_i), \tau(\lambda_j)]$ и вычислены два первых собственных вектора ($\phi_k(\lambda)$ при $k = 1$ и 2) этих матриц [8]. Спектральная структура векторов $\phi_1(\lambda)$ и $\phi_2(\lambda)$ представлена на рис. 2.

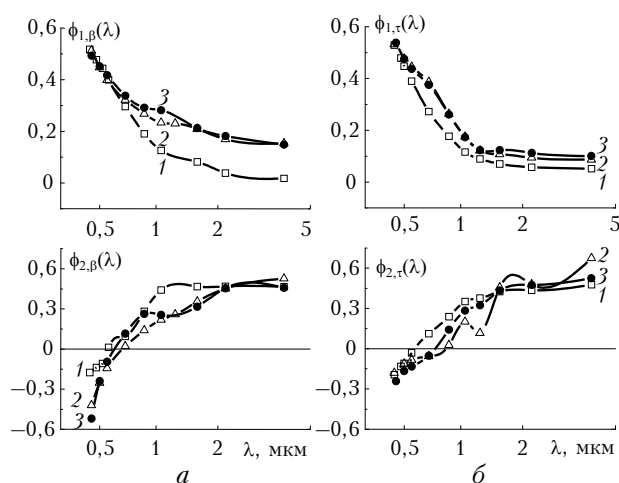


Рис. 2. Спектральный ход первых двух собственных векторов ϕ_1 и ϕ_2 автокорреляционных матриц $\{\beta_i(\lambda)\}$ (а) и $\{\tau_i(\lambda)\}$ (б). Кривые 1, 2, 3 соответствуют данным 2003, 2004 и 2005 гг.

Спектральная зависимость вектора $\phi_1(\lambda)$ отражает скоррелированные во всем спектральном диапазоне знакопостоянные вариации оптических характеристик. Вектор $\phi_2(\lambda)$, в силу ортонормированности собственных векторов, имеет одну смену знака и для рассматриваемого случая отражает антикоррелированные вариации оптических характеристик в видимой и ИК-области длин волн. При рассмотрении собственных векторов автокорреляционной матрицы очень важным параметром является величина нормированных собственных чисел μ_1 и μ_2 , которые показывают, какая доля дисперсии измеряемой величины приходится на тип колебания, соответствующего первому и второму собственным векторам.

Результаты расчета собственных чисел μ_1 и μ_2 , а также их суммы приведены в табл. 4, из которой видно, что в разные годы измерений величина μ_1 изменяется для приземных условий от 84 до 96%, а для оптической толщи от 94 до 97%. Сумма двух чисел $\mu_1 + \mu_2$ для массива $\{\beta_i(\lambda)\}$ изменяется от 97,1 до 99,6%, а для массива $\{\tau_i(\lambda)\}$ от 98,7 до 99,5%.

Таблица 4

Величина (%) нормированных собственных чисел (μ_1 и μ_2) и их сумм для автокорреляционных матриц $\rho[\beta(\lambda_i), \beta(\lambda_j)]$ и $\rho[\tau(\lambda_i), \tau(\lambda_j)]$

Год	$\mu_{1\beta}$	$\mu_{2\beta}$	$\mu_{1\beta} + \mu_{2\beta}$	$\mu_{1\tau}$	$\mu_{2\tau}$	$\mu_{1\tau} + \mu_{2\tau}$
2003	96,1	3,5	99,6	96,8	2,7	99,5
2004	84,3	12,8	97,1	93,5	5,9	99,4
2005	89,2	8,6	97,8	95,2	3,5	98,7

Фактически это означает, что, измеряя $\tau_i(\lambda)$ или $\beta_i(\lambda)$ только на двух длинах волн, можно с высокой точностью восстановить эти характеристики во всем диапазоне длин волн от 0,44 до 4,0 мкм. Восстановление случайной величины $x^i(\lambda_j)$ с помощью разложения по собственным векторам автокорреляционной матрицы можно записать в виде

$$x^i(\lambda_j) = \bar{x}(\lambda_j) + \sum_{k=1}^m C_k^i \phi_k(\lambda_j), \quad (1)$$

где

$$C_k^i = \sum_{j=1}^M [\bar{x}(\lambda_j) - x^i(\lambda_j)] \phi_k(\lambda_j)$$

— коэффициенты разложения. Вклады типов колебаний более высоких порядков ($\phi_k(\lambda)$ при $k > 2$) в этом случае пренебрежимо малы, и их рассмотрение в практическом смысле нецелесообразно.

В табл. 5 приведены рассчитанные значения нормированных коэффициентов автокорреляции $\rho_\beta(0,45; \lambda_i)$ и $\rho_\tau(0,45; \lambda_i)$, а также коэффициенты взаимной корреляции между параметрами β и τ ($\rho_{\beta\tau}(\lambda)$) для массивов 2003–2005 гг.

Таблица 5

Нормированные коэффициенты автокорреляции $\rho_\beta(0,45; \lambda_i)$ и $\rho_\tau(0,45; \lambda_i)$ и взаимной корреляции $\rho_{\beta\tau}(\lambda)$ параметров $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ для массивов 2003–2005 гг. (уровень значимости ~ 0,15)

Коэффициент корреляции	Длина волны λ , мкм							
	0,45	0,55	0,69	0,87	1,06	1,60	2,17	3,91
	2003 г.							
$\rho_\beta(0,45; \lambda_i)$	1,0	0,99	0,98	0,93	0,78	0,62	0,34	0,12
$\rho_\tau(0,45; \lambda_i)$	1,0	0,99	0,99	0,95	0,82	0,65	0,56	0,47
$\rho_{\beta\tau}(\lambda)$	0,67	0,65	0,65	0,61	0,53	0,43	0,33	0,33
	2004 г.							
$\rho_\beta(0,45; \lambda_i)$	1,0	0,94	0,84	0,71	0,71	0,59	0,39	0,30
$\rho_\tau(0,45; \lambda_i)$	1,0	0,99	0,99	0,96	0,87	0,67	0,60	0,50
$\rho_{\beta\tau}(\lambda)$	0,22	0,28	0,27	0,32	0,30	0,23	0,21	0,37
	2005 г.							
$\rho_\beta(0,45; \lambda_i)$	1,0	0,98	0,93	0,88	0,83	0,73	0,58	0,48
$\rho_\tau(0,45; \lambda_i)$	1,0	0,99	0,99	0,98	0,93	0,72	0,66	0,49
$\rho_{\beta\tau}(\lambda)$	0,19	0,22	0,22	0,20	0,14	0,14	0,17	0,12

Из табл. 5 следует, что наиболее тесная взаимная корреляция вариаций параметров β и τ наблюдалась в массиве 2003 г., где коэффициент корреляции $\rho_{\beta\tau}$ в области длины волны $\lambda = 0,45$ мкм достигает значения 0,67. Такой высокий уровень корреляции между β и τ , по-видимому, связан с повышенной задымленностью региона в 2003 г. Приход плотных дымовых образований в район измерений

значительно увеличил диапазон изменчивости аэрозольного ослабления излучения как на приземной трассе, так и по всей толще атмосферы, что и привело к росту коэффициента корреляции параметров β и τ . Для более чистых измерительных сезонов 2004 и 2005 гг. диапазон изменчивости параметров β и τ был значительно меньше, что и приводит к уменьшению взаимной корреляции между параметрами β и τ . Оценки, проведенные по данным табл. 3, показывают, что как в задымленной атмосфере 2003 г., так и в чистых условиях 2004 и 2005 гг. эффективная высота аэрозольной атмосферы в области $\lambda = 0,45$ мкм в среднем составляет 700–800 м.

Для количественной оценки вклада факторов, приводящих к скоррелированным вариациям β и τ , и факторов, уменьшающих эту корреляцию, в данной работе впервые применен метод, в котором рассматриваются не отдельные массивы ($\{\beta_i(\lambda)\}$ и $\{\tau_i(\lambda)\}$) и их вариации, а исследуется изменчивость этих характеристик во взаимосвязи друг с другом. С этой целью был сформирован объединенный массив данных $\{\beta_i(\lambda), \tau_i(\lambda)\}$, размерность которого по длине волны составила 21 точку: 10 для массива $\beta(\lambda)$ и 11 — для $\tau(\lambda)$. На основе этого массива были рассчитаны автокорреляционная матрица $\rho[\beta(\lambda_m), \tau(\lambda_n)]$, ее собственные векторы $\phi_k(\lambda_m)$ и нормированные собственные числа μ_k [8].

На первый взгляд, создание объединенного массива вызывает некоторое сомнение, поскольку у величин, входящих в него, разные размерности (коэффициент β измеряется в км^{-1} , а оптическая толщина атмосферы τ — величина безразмерная). Однако если учесть, что коэффициенты $\beta(\lambda)$ фактически являются оптической толщиной атмосферы на трассе длиной 1 км, то такой «искусственный» массив достаточно строго можно считать безразмерным и однородным по своей физической сути.

На рис. 3 представлены спектральные зависимости первого (ϕ_1) и второго (ϕ_2) собственных векторов автокорреляционной матрицы объединенного массива $\rho[\beta(\lambda_m), \tau(\lambda_n)]$ за 2003–2005 гг. Здесь же приведены значения нормированных собственных чисел (μ_1) и (μ_2) соответствующих автокорреляционных матриц.

Результаты, представленные на рис. 3, а–в, показывают, что на первый собственный вектор приходится от 55 до 82% дисперсии.

Заметим, что спектральная структура этого вектора отражает знакопостоянную и в целом синхронную изменчивость вариаций $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ по всему диапазону длин волн для всех трех массивов. По-видимому, такой тип вариаций $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ связан с приходом в регион воздушных масс с различным аэрозольным наполнением в зоне перемешивания. При этом следует ожидать, что чем сильнее будет замутнение в зоне перемешивания, тем больший вклад в дисперсию будет давать первый вектор. Это предположение подтверждают данные задымленного массива 2003 г., где на этот тип вариаций за счет сильного задымления зоны перемешивания приходится наибольшая доля дисперсии — 82%.

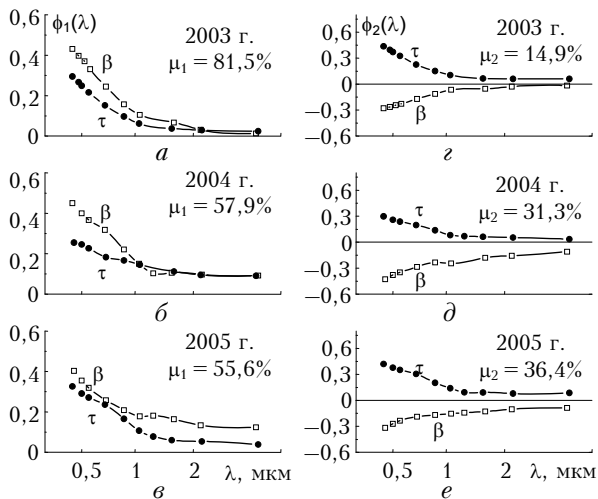


Рис. 3. Спектральный ход собственных векторов $\phi_1(\lambda)$ и $\phi_2(\lambda)$ автокорреляционной матрицы для объединенных массивов $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$

На рис. 3, z – e приведены спектральные ходы знакопеременного второго вектора, причем изменение знака происходит между массивами $\{\beta_i(\lambda)\}$ и $\{\tau_i(\lambda)\}$. Такой тип колебаний возможен в случае обмена аэрозолем разных фракций приповерхностного слоя с атмосферой более высоких слоев, связанного, например, с суточным ходом температуры воздуха. Заметим, что на такой тип колебаний приходится 31–36% дисперсии измеряемых характеристик в чистых условиях (рис. 3, d , e), а в задымленный 2003 г. (рис. 3, z) только 15%.

На рис. 4 на основе объединенных массивов 2003 и 2005 гг. представлены результаты восстановления спектральной структуры коэффициента $\beta(\lambda)$ и оптической толщины $\tau(\lambda)$ в предположении, что изменчивость этих величин обусловлена только первым собственным вектором $\phi_1(\lambda)$.

Расчет проводился по формуле (1) с использованием трех значений коэффициентов разложения $C_k^i(\lambda)$. Кривые 2 на рис. 4 рассчитаны для $C_k^i(\lambda) = 0$, что соответствует средним значениям $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$, а кривые 1 и 3 рассчитаны для минимальных и максимальных $C_k^i(\lambda)$, что в данном случае (для вектора $\phi_1(\lambda)$) соответствует минимальным и максимальным замутнениям атмосферы. Для этих трех случаев на нижних рисунках представлен спектральный ход высоты однородной аэрозольной атмосферы $H_0(\lambda)$.

Близость значений $H_0(\lambda)$ для разных типов замутнений указывает на то, что вариации характеристик $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$, связанные с первым собственным вектором, обусловлены сменой воздушных масс с различной оптической плотностью, но с близким вертикальным распределением аэрозоля. Исключение составляют дымовые ситуации, наблюдавшиеся в 2003 г. (кривая 3 на рис. 4, z), когда основная масса дымового аэрозоля была сосредоточена в нижних слоях атмосферы. Необходимо заметить также, что спектральные зависимости параметра $H_0(\lambda)$ в 2003 и в 2005 гг. существенно различаются между собой (рис. 4, z , e).

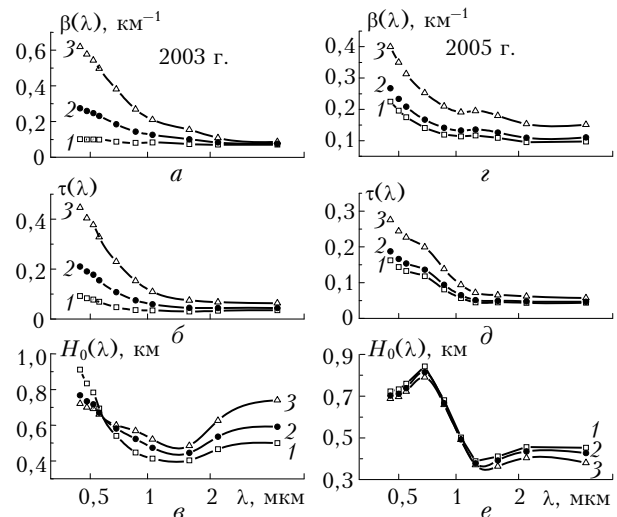


Рис. 4. Восстановленные спектры $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ для минимальных (кривые 1), средних (2) и максимальных (3) замутнений атмосферы при использовании в расчетах только первого собственного вектора $\phi_1(\lambda)$ и соответствующие им значения высоты однородной атмосферы $H_0(\lambda)$

На рис. 5 представлены результаты восстановления спектральной структуры коэффициента $\beta(\lambda)$ и оптической толщины $\tau(\lambda)$ для массивов 2003 и 2004 гг. в предположении, что изменчивость этих величин обусловлена только вторым (знакопеременным) собственным вектором $\phi_2(\lambda)$.

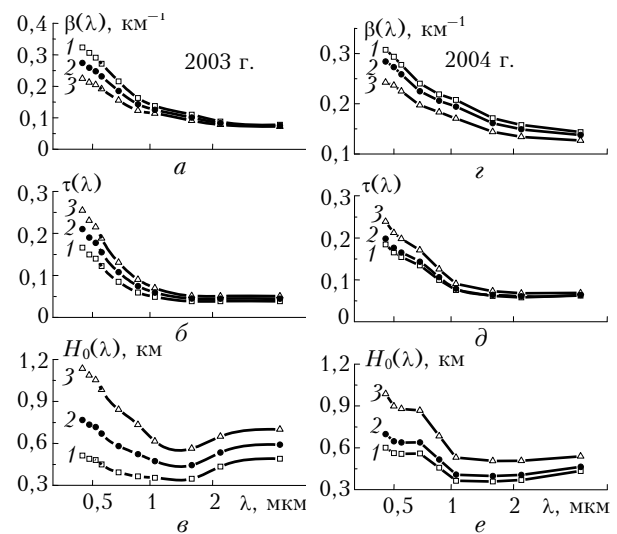


Рис. 5. Восстановленные спектры $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ при использовании в расчетах только второго собственного вектора $\phi_2(\lambda)$ для трех значений коэффициентов разложения $C_k^i(\lambda)$ и соответствующие значения высоты однородной аэрозольной атмосферы $H_0(\lambda)$ в 2003 и 2004 гг.

Расчет проводился также с использованием трех значений коэффициентов разложения $C_k^i(\lambda)$. Кривые 2 на рис. 5 рассчитаны для $C_k^i(\lambda) = 0$, что соответствует средним значениям $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$, а кривые 1 и 3 – для минимальных и максимальных $C_k^i(\lambda)$. Здесь же приведены соответствующие расчетные спектральные зависимости параметра $H_0(\lambda)$.

Из рис. 5 следует, что при данном варианте восстановления спектров $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ с использованием только вектора $\phi_2(\lambda)$ максимальным значениям оптической толщины $\tau(\lambda)$ соответствуют минимальные значения коэффициентов ослабления в приземном слое $\beta(\lambda)$ (кривые 3) и, как следствие, максимальные значения $H_0(\lambda)$. И наоборот, минимальным значениям $\tau(\lambda)$ соответствуют максимальные значения $\beta(\lambda)$ и минимальные $H_0(\lambda)$ (кривые 1). То есть для антикоррелированных вариаций измеряемых параметров $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ наблюдается наибольшая изменчивость высоты однородной атмосферы.

Заметим, что рассмотренные выше схемы восстановления параметров $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ применялись здесь лишь для выявления основных тенденций в изменчивости параметра $H_0(\lambda)$. Естественно, что в реальной среде вариации оптических характеристик, как правило, обусловлены совокупностью нескольких факторов.

Заключение

Проведена статистическая обработка данных одновременных измерений коэффициентов аэрозольного ослабления оптического излучения в приземном слое воздуха и оптической толщины всей атмосферы в диапазоне длин волн $0,44\div 4,0$ мкм за 2003–2005 гг. с целью выявления и количественной оценки факторов, которые обуславливают коррелированную и некоррелированную изменчивость аэрозольного ослабления оптического излучения на приземных и наклонных трассах. Выявлено, что максимальный уровень взаимной корреляции между вариациями $\beta(\lambda)$ и $\tau(\lambda)$ наблюдался в массиве 2003 г. в условиях повышенной задымленности атмосферы.

Предполагается, что субмикронные дымовые частицы заполняют слой перемешивания и вследствие высокой концентрации вносят значимый вклад в аэрозольное ослабление как на приземной трассе, так и по всей толще атмосферы. Для более чистых измерительных сезонов 2004 и 2005 гг. коэффициенты взаимной корреляции $\rho_{\beta\tau}(\lambda)$ оказываются значительно ниже, что свидетельствует о том, что в данных массивах вариации параметров β и τ обусловлены разными факторами. Для количественной оценки вклада этих факторов в работе впервые был сформирован объединенный массив данных $\{\beta_i(\lambda), \tau_i(\lambda)\}$, позволяющий исследовать изменчивость параметров β и τ во взаимосвязи друг с другом.

Проведенный расчет собственных векторов автокорреляционной матрицы показал, что на первый вектор приходится от 55 до 82% дисперсии измеренных величин, связанных, вероятно, со сменой воздушных масс в регионе. Показано, что такому типу вариаций соответствует минимальная изменчивость спектральных значений высоты однородной аэрозольной атмосферы и что на второй собственный вектор, который приводит к разрушению взаимной корреляции между β и τ , приходится от 15 до 36% дисперсии. Вероятно, этот тип колебаний связан с процессом выноса аэрозоля конвективными и турбулентными потоками, в результате чего идет накопление аэрозоля по толще за счет обеднения приземного слоя атмосферы. Возможен также обратный процесс, связанный с осаждением аэрозоля.

1. *Балин Ю.С., Еришов А.Д.* Вертикальная структура аэрозольных полей пограничного слоя атмосферы по данным лазерного зондирования // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 7. С. 616–623.
2. *Балин Ю.С., Еришов А.Д., Пеннер И.Э., Макухин В.Л., Маринайте И.И., Потемкин В.Л., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Бутуханов В.П.* Экспериментальные и модельные исследования пространственного распределения атмосферного аэрозоля над акваторией оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 2. С. 114–121.
3. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н.* Исследование одновременных вариаций аэрозольного ослабления радиации на горизонтальных и наклонных трассах // Оптика атмосф. и океана, 2002. Т. 15. № 4. С. 321–327.
4. *Esposito F., Serio C., Horvath H.* Vertical and horizontal aerosol spectral extinction at a rural location in southern Italy // J. Geophys. Res. D. 1996. V. 101. N 14. P. 19285–19292.
5. *Qiu Jinhuan, Zong Xuemei, Zhang Xiaoye.* A study of the scaling height of the tropospheric aerosol and its extinction coefficient profile // J. Aerosol Sci. 2005. V. 36. N 3. P. 361–371.
6. *Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* Исследования дневной динамики аэрозольного ослабления оптической радиации в дымках на приземной и наклонной трассах // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 8. С. 708–713.
7. *Рахимов Р.Ф., Ужegov В.Н., Макиенко Э.В., Пхалагов Ю.А.* О наиболее вероятных значениях коэффициента аэрозольного ослабления атмосферной дымки по долговременным рядам наблюдений на приземной горизонтальной трассе // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 7. С. 566–573.
8. *Обухов А.М.* О статистических ортогональных разложениях эмпирических функций // Изв. АН СССР. Сер. Геофиз. 1960. Т. 1. № 3. С. 432–439.

V.N. Uzhegov, D.M. Kabanov, Yu.A. Pkhalagov, S.M. Sakerin. Correlation between variations of aerosol extinction in visible and IR radiation in near-ground air layer and in the atmospheric column.

The data arrays of spectral coefficients of aerosol extinction in the near-ground air layer $\beta(\lambda)$ and the aerosol optical thickness of the atmosphere $\tau(\lambda)$ in the wavelength range $\lambda = 0.44\text{--}4.0$ μm obtained in the region of Tomsk in 2003–2005 are statistically processed. It is revealed that the maximal correlation between variations $\beta(\lambda)$ and $\tau(\lambda)$ was observed in 2003 under conditions of enhanced turbidity of the atmosphere. It is shown that this can be related with increase of the range of variability of aerosol extinction both on near-ground path and in the atmospheric column during coming smoke into the region of measurements. The correlation coefficients $\rho_{\beta\tau}(\lambda)$ under cleaner conditions are significantly lower. Calculation of eigenvectors of the combined autocorrelation matrix $\{\beta_i(\lambda), \tau_i(\lambda)\}$ has shown that destruction of correlation between variations $\beta(\lambda)$ and $\tau(\lambda)$ can be related with the process of emission of particles by convective and turbulent flows, which favor accumulation of aerosol in the atmospheric column due to depletion of the near-ground layer of the atmosphere. The inverse process, related with aerosol sedimentation, is also possible.