

Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужегов

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОБЩЕГО ОСЛАБЛЕНИЯ ИК РАДИАЦИИ НА КОМПОНЕНТЫ

На основе линейного множественного регрессионного анализа массива коэффициентов общего ослабления излучения $\epsilon(\lambda)$ в диапазоне длин волн $\lambda = 0,55 - 12$ мкм показана возможность разделения общего ослабления на аэрозольную и молекулярную компоненты. В качестве входных параметров в двухпараметрическом представлении коэффициента $\epsilon(\lambda)$ используется коэффициент аэрозольного ослабления в области $\lambda = 0,55$ мкм и парциальное давление паров воды. Проведено количественное сопоставление полученной зависимости коэффициента молекулярного поглощения в области $\lambda = 10,6$ мкм от парциального давления паров воды с данными лабораторных исследований и показано их удовлетворительное согласие. Показано также, что в реальной атмосфере эта зависимость практически не отличается от линейной.

Среди существующих методов исследований закономерностей аэрозольного ослабления видимой и ИК-радиации в приземных атмосферных дымках наиболее корректным является метод, основанный на базовых измерениях пропускания атмосферы в окнах прозрачности на протяженных трассах. Неселективный характер спектральной структуры коэффициентов аэрозольного ослабления позволяет использовать при этом тепловые источники света, перекрывающие широкий диапазон длин волн, и спектральные приборы с низким разрешением, что увеличивает энергетический потенциал измерительной установки. Вместе с тем низкое спектральное разрешение приводит к тому, что в ИК окнах прозрачности атмосферы значительный вклад в измеряемый коэффициент ослабления может вносить молекулярное поглощение атмосферных газов, корректный учет которого представляется довольно сложной задачей. Обычно применяемый для этой цели расчет функций пропускания атмосферных газов (включая пары воды) с помощью эмпирических методик [1–4] или прямого расчета [5] требует точного знания аппаратной функции спектрального прибора и ошибка в ее определении автоматически приводит к ошибке в величине молекулярной компоненты ослабления, особенно в областях, где значителен вклад селективного поглощения атмосферных газов.

В данной работе предлагается статистический метод разделения коэффициента общего ослабления на аэрозольную и молекулярную компоненты с помощью линейного множественного регрессионного анализа при любом (неизвестном) спектральном разрешении прибора.

1. Исходное уравнение. Коэффициенты регрессии [6, 7]

Известно, что задачей регрессионного анализа является получение оптимальной оценки переменной x_0 по измеренным значениям x_1, x_2, \dots, x_m , которые могут быть зависимыми друг от друга [6]. В случаях если x_0 линейно зависит от аргументов $x_1 \dots x_m$, то уравнение множественной регрессии для x_{0j} (где $j = 1 \dots n$, n — размерность массива) можно представить в виде

$$x_{0j} = K_0 + K_1 \cdot x_{1j} + K_2 \cdot x_{2j} + \dots + K_m \cdot x_{mj} + \delta_j, \quad (1)$$

где $K_1 \dots K_m$ — коэффициенты регрессии, определяющие весовой вклад переменных $x_1 \dots x_m$ в x_0 , подбираются таким образом, чтобы минимизировать погрешность восстановления x_0 , (т.е. $\sum_{j=1}^n \delta_j^2 \rightarrow \min$);

K_0 — свободный член уравнения, учитывающий вклад в x_0 параметров, некоррелирующих с переменными $x_1 \dots x_m$. Заметим, что переменные $x_1 \dots x_m$ часто называют входными параметрами уравнения.

Коэффициенты регрессии уравнения (1) в соответствии с введенной индексацией, вычисляются по следующей схеме:

$$K_1 = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \cdot \frac{|M_1|}{|M_0|}; \quad K_2 = \frac{\sigma_0}{\sigma_2} \cdot \frac{|M_2|}{|M_0|}; \dots; \quad K_m = \frac{\sigma_0}{\sigma_m} \cdot \frac{|M_m|}{|M_0|}, \quad (2)$$

где σ_i — среднеквадратическое отклонение величин $x_0, x_1 \dots x_m$, $|M_0|$ — детерминант матрицы, которая имеет следующий вид:

$$|M_0| = \begin{vmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1m} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \dots & \rho_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{m1} & \rho_{m2} & \dots & \rho_{mm} \end{vmatrix}, \quad (3)$$

а $|M_i|$ — детерминант матрицы, получаемой из $|M_0|$ путем замены i -й строки на строку вида $(\rho_{i0}, \rho_{i1}, \dots, \rho_{im})$, где ρ — коэффициенты взаимной корреляции между параметрами x_0, x_1, \dots, x_m . Коэффициент K_0 рассчитывается по формуле:

$$K_0 = \bar{x}_0 - K_1 \bar{x}_1 - K_2 \bar{x}_2 - \dots - K_m \bar{x}_m, \quad (4)$$

где $\bar{x}_0, \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_m$ — средние значения этих параметров.

Расчет погрешности восстановления величины x_0 в случае двух входных параметров x_1 и x_2 производится по формуле:

$$\delta_{x_0} = \sigma_0 \cdot [(1 - \rho_{01}^2) \cdot (1 - \rho_{02/1}^2)]^{1/2}, \quad (5)$$

В случае трехпараметрического уравнения расчет δ_{x_0} осуществляется в соответствии с выражением:

$$\delta_{x_0} = \sigma_0 \cdot [(1 - \rho_{01}^2) \cdot (1 - \rho_{02/1}^2) \cdot (1 - \rho_{03/12}^2)]^{1/2}, \quad (6)$$

где $\rho_{02/1}$ и $\rho_{03/12}$ — частные коэффициенты корреляции, показывающие меру линейной связи между параметрами x_0 и x_2 при фиксированном среднем значении x_1 и между x_0 и x_3 при фиксации x_1 и x_2 соответственно. Расчет частных коэффициентов корреляции производится по формулам:

$$\rho_{02/1} = (\rho_{02} - \rho_{01} \cdot \rho_{12}) \cdot [(1 - \rho_{01}^2) \cdot (1 - \rho_{12}^2)]^{-1/2}; \quad (7)$$

$$\rho_{03/12} = (\rho_{03/1} - \rho_{02/1} \cdot \rho_{23/1}) \cdot [(1 - \rho_{02/1}^2) \cdot (1 - \rho_{23/1}^2)]^{-1/2}. \quad (8)$$

Применимость множественного регрессионного анализа к задаче разделения коэффициентов общего ослабления оптической радиации $\epsilon(\lambda)$ (λ — длина волны) на аэрозольную и молекулярную компоненты рассмотрим на примере массива $\{\epsilon(\lambda)\}$, полученного при измерениях в дымках прибрежной зоны Черного моря в августе — сентябре 1981 г. с помощью аппаратного комплекса [8, 9]. Под коэффициентом $\epsilon(\lambda)$ в данном случае понимается параметр, связанный с пропусканием атмосферы $T(\lambda)$ соотношением Бугера

$$T(\lambda) = \exp(-\epsilon(\lambda) \cdot L),$$

где L (км) — длина трассы.

Синхронно с оптическими измерениями осуществлялись измерения парциального давления паров воды (e), относительной влажности (r) и температуры (t) воздуха. Всего за период измерений был получен массив, насчитывающий 168 реализаций спектров $\epsilon(\lambda)$, и соответствующие ему массивы e , r и t .

Таблица 1

Статистические характеристики метеопараметров

y	\bar{y}	σ_y	ρ_{yr}	ρ_{ye}	ρ_{yt}
r , %	73,6	12,4	1,00	0,53	-0,22
e , мбар	17,4	4,1		1,00	0,70
t , °C	20,0	3,3			1,00

2. Статистические характеристики массивов и выбор входных параметров

С помощью известных выражений математической статистики [6, 7] были рассчитаны средние значения измеренных параметров $\bar{\epsilon}(\lambda), \bar{r}, \bar{e}$ и \bar{t} , их стандартные отклонения $\sigma_\epsilon, \sigma_r, \sigma_e$ и σ_t , нормированная автокорреляционная матрица коэффициентов ослабления $\rho_{\epsilon(\lambda_k)\epsilon(\lambda_l)}$, коэффициенты взаимной корреляции $\rho_{er}, \rho_{er}, \rho_{et}, \rho_{re}, \rho_{rt}$ и ρ_{et} . Для удобства представления статистические характеристики мас-

сива метеоэлементов даны в табл. 1, а все характеристики, связанные с коэффициентами ослабления радиации $\epsilon(\lambda)$, сведены в табл. 2. Заметим, что в коротковолновой области спектра значения $\epsilon(\lambda)$ скорректированы на рэлеевское рассеяние [10]. С учетом такой коррекции коэффициент $\epsilon(0,55)$, приведенный в таблице, по существу является коэффициентом аэрозольного ослабления, который мы далее будем обозначать как $\alpha(0,55)$.

Таблица 2

Статистические характеристики массива экспериментальных данных

λ , МКМ	$\epsilon(\lambda)$, км ⁻¹	$\sigma_{\epsilon(\lambda)}$, км ⁻¹	$P_{\epsilon(0,55)\epsilon(\lambda)}$	$P_{\epsilon(1,06)\epsilon(\lambda)}$	$P_{\epsilon(3,17)\epsilon(\lambda)}$	$P_{\epsilon(\lambda)/r}$	$P_{\epsilon(\lambda)/e}$	$P_{\epsilon(\lambda)l}$
0,55	0,224	0,152	1,00	0,952	0,798	0,620	0,597	0,181
0,69	0,182	0,112	0,994	0,961	0,816	0,589	0,605	0,214
0,87	0,153	0,082	0,978	0,978	0,853	0,554	0,587	0,222
1,06	0,146	0,075	0,952	1,00	0,914	0,588	0,611	0,278
1,25	0,157	0,070	0,938	0,993	0,939	0,507	0,627	0,312
1,60	0,136	0,060	0,894	0,976	0,961	0,438	0,623	0,365
2,20	0,151	0,057	0,854	0,950	0,976	0,407	0,643	0,411
3,50	0,190	0,057	0,834	0,933	0,964	0,398	0,691	0,466
3,90	0,146	0,050	0,798	0,914	1,00	0,375	0,569	0,352
4,65	0,322	0,071	0,839	0,910	0,933	0,477	0,789	0,510
8,30	0,254	0,073	0,811	0,878	0,896	0,497	0,825	0,529
8,60	0,231	0,068	0,827	0,900	0,925	0,498	0,783	0,481
9,20	0,213	0,068	0,846	0,913	0,929	0,510	0,762	0,448
10,20	0,258	0,081	0,802	0,856	0,866	0,512	0,831	0,516
10,60	0,302	0,090	0,792	0,837	0,839	0,533	0,838	0,490
11,10	0,333	0,094	0,779	0,815	0,812	0,570	0,840	0,479
11,60	0,389	0,107	0,754	0,792	0,794	0,546	0,825	0,431

Анализ данных табл. 2 показывает наличие достаточно высокой корреляции между коэффициентами ослабления в видимой и ИК-области спектра, что является основанием для выбора коэффициента $\alpha(0,55)$ в качестве одного из входных параметров уравнения (1), характеризующего аэрозольную компоненту ослабления как в видимом, так и в ИК-диапазоне длин волн. В качестве входного параметра, ответственного за молекулярное поглощение радиации, естественно выбрать парциальное давление паров воды — e , поскольку именно пары воды являются основным поглощающим компонентом атмосферы в ИК диапазоне длин волн, о чем свидетельствуют, в частности, высокие коэффициенты взаимной корреляции $\rho_{\epsilon e}$ в области $\lambda = 8 - 12$ мкм (табл. 2). Оптимальное число входных параметров в уравнении (1) можно оценить по (6), анализируя темп убывания погрешности $\delta\epsilon(\lambda)$ по мере увеличения числа входных параметров. Такие оценки, проведенные для $\epsilon(10,6)$, показывают, что введение температуры воздуха третьим входным параметром практически не приводит к уменьшению погрешности восстановления $\epsilon(10,6)$, следовательно, для решения задачи разделения общего ослабления на компоненты можно использовать двухпараметрическое представление уравнения регрессии:

$$\epsilon(\lambda) = K_0(\lambda) + K_1(\lambda) \cdot \alpha(0,55) + K_2(\lambda) \cdot e + \delta_{\epsilon(\lambda)} \quad (9)$$

Заметим, что хотя коэффициенты корреляции $\rho_{\epsilon(1,06)\epsilon(\lambda)}$ и $\rho_{\epsilon(3,9)\epsilon(\lambda)}$ выше, чем $\rho_{\alpha(0,55)\epsilon(\lambda)}$ (см. табл. 2), но для рассматриваемой задачи использование коэффициента ослабления в видимом диапазоне спектра является предпочтительным в связи с отсутствием здесь молекулярного поглощения атмосферных газов.

В двухпараметрическом представлении $\epsilon(\lambda)$ расчет коэффициентов K_0 , K_1 , K_2 и погрешности $\delta_{\epsilon(\lambda)}$ проводился по формулам (2)–(5) и (7) с использованием данных, содержащихся в табл. 1 и табл. 2. Результаты этого расчета приведены в табл. 3. С помощью уравнения (9) и табл. 3 можно восстановить значения $\epsilon(\lambda)$ в области длин волн 0,55–11,6 мкм для достаточно широкого диапазона изменений $\alpha(0,55)$ и e , но для разделения $\epsilon(\lambda)$ на аэрозольную $\alpha(\lambda)$ и молекулярную $\beta(\lambda)$ компоненты нужно предварительно рассмотреть вопрос о физическом содержании коэффициента $K_0(\lambda)$.

Таблица 3

Численные значения параметров K_0 , K_1 , K_2 и δ_{ϵ} к уравнению (9)

λ , мкм	$K_0(\lambda)$, км ⁻¹	$K_1(\lambda)$, Б/р	$K_2(\lambda)$, км ⁻¹ ·мбар ⁻¹	$\delta_{\epsilon(\lambda)}$, км ⁻¹
0,55	0,000	1,00	0,0000	0,000
0,69	0,010	0,730	0,0005	0,012
0,87	0,033	0,528	0,0001	0,017
1,06	0,024	0,452	0,0012	0,023
1,25	0,035	0,404	0,0018	0,023
1,60	0,029	0,321	0,0020	0,026
2,20	0,039	0,276	0,0029	0,028
3,50	0,061	0,248	0,0042	0,028
3,90	0,062	0,235	0,0018	0,030
4,65	0,125	0,268	0,0079	0,029
8,30	0,035	0,239	0,0095	0,029
8,60	0,042	0,253	0,0076	0,030
9,20	0,035	0,274	0,0067	0,029
10,20	0,011	0,254	0,0109	0,033
10,60	0,024	0,269	0,0125	0,036
11,10	0,038	0,269	0,0135	0,039
11,60	0,058	0,287	0,0153	0,049

В общем случае $K_0(\lambda)$ включает в себя доли как молекулярной $K_0^M(\lambda)$, так и аэрозольной $K_0^A(\lambda)$ компонент. Молекулярная составляющая $K_0(\lambda)$ обусловлена поглощением излучения газовыми компонентами атмосферы такими как CO₂, O₃, CO, CH₄, N₂O и др. Аэрозольная доля $K_0(\lambda)$ связана в основном с линейной аппроксимацией связи между коэффициентами аэрозольного ослабления в видимой и ИК-областях спектра и некоррелированностью их вариаций. Для доказательства последнего на рис. 1 приведена связь коэффициентов аэрозольного ослабления для $\lambda = 0,55$ мкм и $\lambda = 1,60$ мкм. Значения $\alpha(1,60)$ рассчитывались в соответствии с (9) и табл. 3 по формуле

$$\alpha(1,60) = \epsilon(1,60) - 0,002 \cdot e$$

в предположении, что K_0 в этом окне полностью определяется аэрозолями. Из рисунка видно, что разброс экспериментальных точек, обусловленный некоррелированностью вариаций $\alpha(0,55)$ и $\alpha(1,60)$ при высоких видимостях ($\alpha(0,55) < 0,1$ км⁻¹) резко ограничен сверху биссектрисой (прямая 2), что приводит к появлению слабо выраженной нелинейной связи между $\alpha(0,55)$ и $\alpha(1,60)$. В результате

прямая регрессии по всему массиву (прямая 1) идет не в начало координат, а дает отсечку на оси $\alpha(1,60)$, равную $-0,025 \text{ км}^{-1}$, что и является аэрозольной составляющей $K_0(1,60)$.

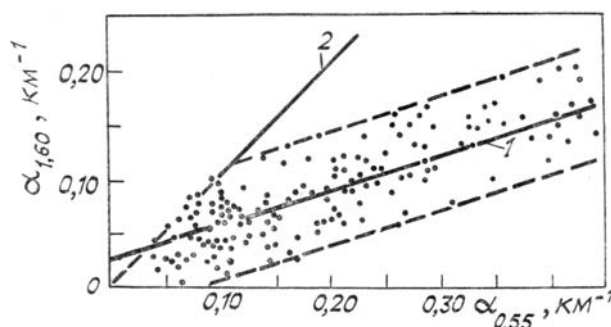


Рис. 1. Схема формирования коэффициента K_0^a в области $\lambda = 1,60 \text{ мкм}$ при использовании линейной регрессии: 1 – прямая регрессии; 2 – биссектриса

Таблица 4

Численные значения коэффициентов $K_0^a(\lambda)$

λ , мкм	0,69	0,87	1,06	1,25	1,60	2,20	3,50	3,90
K_0^a , км ⁻¹	0,010	0,020	0,023	0,025	0,029	0,031	0,032	0,033
λ , мкм	4,65	8,30	8,60	9,20	10,20	10,60	11,10	11,60
K_0^a , км ⁻¹	0,032	0,033	0,32	0,031	0,032	0,036	0,039	0,049

Тот факт, что максимальные значения $\alpha(1,60)$ лежат вблизи биссектрисы, указывает на то, что в дымках прибрежной зоны в условиях высокой прозрачности имеет место нейтральное ослабление видимой и ИК-радиации, обусловленное рассеянием радиации на грубодисперсном аэрозоле. Это означает, что линейные аппроксимации связи $\alpha(\lambda)$ с $\alpha(0,55)$ для всех λ должны пересекаться в точке, близкой к точке пересечения прямых 1 и 2 (рис. 1). Координаты этой точки были уточнены по коротковолновой области спектра ($\lambda = 0,69$ и $1,06 \text{ мкм}$), где все ослабление обязано аэрозолю. Используя точку пересечения с координатами $\alpha^*(0,55) = 0,046 \text{ км}^{-1}$ и $\alpha^*(1,60) = 0,044 \text{ км}^{-1}$ и угловые коэффициенты $K_1(\lambda)$ (табл. 2), значения $K_0^a(\lambda)$ можно рассчитать по следующей формуле: $K_0^a(\lambda) = \alpha^*(\lambda) - K_1(\lambda) \cdot \alpha^*(0,55)$. Найденные значения $K_0^a(\lambda)$, приведенные в табл. 4, оказались очень близки и по величине и по спектральному ходу к значениям $\delta_{\varepsilon(\lambda)}$ (табл. 3), что свидетельствует о том, что именно некоррелированность аэрозольной компоненты в видимой и ИК-областях спектра обуславливает погрешность восстановления $\varepsilon(\lambda)$ в модели (9). Отметим, что приведенные в табл. 4 значения коэффициентов $K_0^a(\lambda)$ в области $\lambda > 10,6 \text{ мкм}$ скорректированы в соответствии с $\delta_{\varepsilon(\lambda)}$, т.к. описанный выше метод нахождения $K_0^a(\lambda)$ не учитывает возможного поглощения ИК-радиации атмосферным аэрозолем.

Таблица 5

Численные значения коэффициентов $K_0^M(\lambda)$

λ , мкм	0,69	0,87	1,06	1,25	1,60	2,20	3,50	3,90
K_0^M , км ⁻¹	0,0	0,013	0,001	0,010	0,0	0,008	0,029	0,029
λ , мкм	4,65	8,30	8,60	9,20	10,20	10,60	11,10	11,60
K_0^M , км ⁻¹	0,093	0,002	0,010	0,004	-0,021	-0,012	-0,001	0,009

Соответствующие значения $K_0^M(\lambda)$, которые легко находятся по формуле

$$K_0^M(\lambda) = K_0(\lambda) - K_0^a(\lambda),$$

приведены в табл. 5. В области спектра 0,87–4,65 мкм полученные $K_0^M(\lambda)$ представляют собой ничто иное, как суммарные коэффициенты молекулярного поглощения атмосферных газов — $\beta(\lambda)$ при средних концентрациях. Сопоставление $\beta(\lambda)$, полученных в настоящей работе, с соответствующими величинами, рассчитанными по данным [2] и [3] для CO_2 , CO , N_2O , CH_4 , O_3 , и $(\text{N}_2)_2$, подтверждают этот вывод (см. табл. 6). В области окна прозрачности 8–12 мкм истинное значение коэффициентов поглощения газовыми примесями атмосферы искажается возможным проявлением нелинейной зависимости $\varepsilon(\lambda)$ от e , что приводит в некоторых случаях к появлению отрицательных значений K_0^M . Ниже будет показано, что выявленная таким образом нелинейность является очень слабой и не ограничивает применимость линейного аппарата для решения данной задачи.

Таблица 6

Суммарные коэффициенты поглощения атмосферных газов $\beta(\lambda)$, км^{-1}

λ , мкм	[2]	[3]	Настоящая работа
2,20	0,013	0,017	0,008
3,50	0,019	0,023	0,029
3,90	0,024	0,024	0,029
4,65	0,100	0,128	0,093

3. Конечное уравнение. Результаты разделения

С учетом разделения коэффициента K_0 на составляющие K_0^a и K_0^M уравнение (9) можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon(\lambda) = [K_0^a(\lambda) + K_1(\lambda) \cdot z(0,55)] + [K_0^M(\lambda) + K_2(\lambda) \cdot e], \quad (10)$$

где первая скобка представляет собой аэрозольную компоненту коэффициента $\varepsilon(\lambda)$, а вторая — его молекулярную часть. В этом случае выделение аэрозольной компоненты из измеренного значения $\varepsilon(\lambda)$ производится по формуле:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) - [K_0^M(\lambda) + K_2(\lambda) \cdot e]. \quad (11)$$

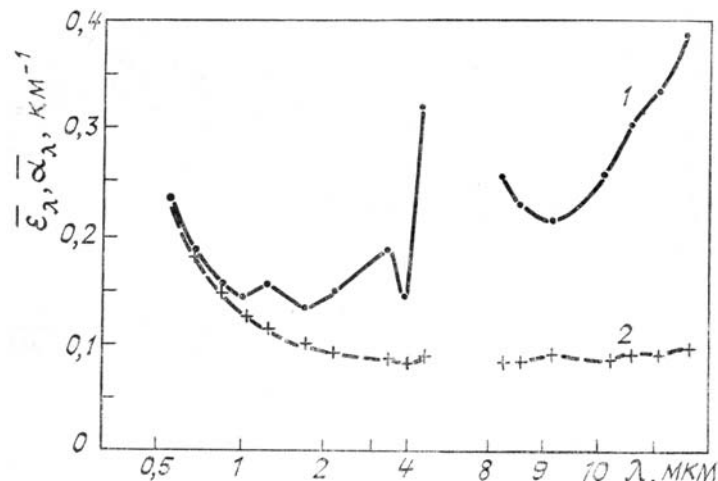


Рис. 2. Средняя спектральная структура коэффициентов ослабления оптической радиации в дымках прибрежной зоны: 1 — общее ослабление $\varepsilon(\lambda)$; 2 — аэрозольное ослабление $\alpha(\lambda)$, выделенное статистическим методом

Пример такого выделения для средних значений $\varepsilon(\lambda)$ приведен на рис. 2. Полученный спектральный ход коэффициентов аэрозольного ослабления $\alpha(\lambda)$, плавно убывающий с ростом длины волны излучения (кривая 2), качественно хорошо согласуется с существующими представлениями о

спектральной зависимости аэрозольного ослабления в атмосферных дымках, что свидетельствует о правильности выбранного метода разделения. Для количественной оценки этого метода проведем сопоставление полученных значений коэффициентов молекулярного поглощения $\beta(\lambda)$ в области $\lambda = 10,6$ мкм (где они практически не зависят от спектрального разрешения) с имеющимися лабораторными данными по коэффициентам поглощения излучения в континууме водяного пара [11]. Такое сопоставление приведено на рис. 3, где точками показана связь коэффициентов общего ослабления $\epsilon(10,6)$ с парциальным давлением паров воды, а прямая 1 и кривая 2 соответствуют вкладу молекулярного поглощения в этой области спектра, рассчитанному настоящим методом и по данным [11] соответственно. Отметим, что расчет $\beta(\lambda)$ по [11] проводился с учетом зависимости парциального давления паров воды от температуры воздуха. То обстоятельство, что и прямая 1, и кривая 2 проходят по минимальным точкам зависимости $\epsilon(e)$, свидетельствует о том, что оба метода качественно верно учитывают вклад молекулярной компоненты, а близость оценок, даваемых обоими методами, указывает на их количественное соответствие.

Возвращаясь к вопросу о характере зависимости коэффициента континуального поглощения от парциального давления паров воды и анализируя данные, приведенные на рис. 3, можно сделать вывод о том, что в реальной атмосфере для ограниченного диапазона изменчивости e эта зависимость в области $\lambda = 10,6$ мкм практически не отличается от линейной. Аналогичный результат был получен и в работах [12, 13]. Это, конечно, не означает, что нелинейная зависимость континуального поглощения от e , обнаруженная в лабораторных [11, 14] и в теоретических [15, 16] исследованиях, вообще не наблюдается в реальной атмосфере. Не исключено, что такое несоответствие данных обусловлено ограниченным диапазоном изменчивости e в натурных измерениях, а также компенсирующим влиянием температуры воздуха, которая всегда положительно коррелирует с парциальным давлением паров воды (см., напр., табл. 1).

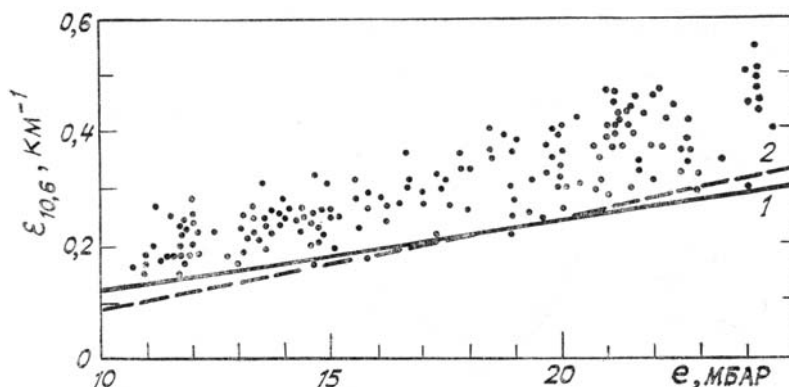


Рис. 3. Связь коэффициентов общего ослабления в области $\lambda = 10,6$ мкм с парциальным давлением паров воды (точки): 1 — вклад молекулярного поглощения, выделенный статистическим методом; 2 — расчет по данным [11]

Для окончательного решения этого вопроса необходимы статистически обеспеченные измерения спектральных коэффициентов ослабления радиации в условиях высокой прозрачности атмосферы, при обработке которых может оказаться весьма полезным аппарат множественной регрессии.

1. Москаленко Н. И. // Изв. АН СССР. ФАО. 1969. Т. 5. №9. С. 262.
2. Kneizys F. X., Shettle E. P., Gallery W. O. et al. Report AFGL-TR-80-0067, Environmental Research Papers. 1980. №697. 233 p.
3. Филиппов В. Л., Козлов С. Д., Румянцева Н. А. и др. // Изв. вузов. Физика. 1984. №8. С. 126.
4. Броунштейн А. М., Фролов А. Д. // Труды ГГО. 1985. Вып. 496. С. 70.
5. Зуев В. Е., Макушки Ю. С., Мицель А. А. и др. // ДАН СССР. 1985. Т. 283. №2. С. 345.
6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. // М.: Финансы и статистика. 1986. 366 с.
7. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений. // М.: Наука. 1971. 576 с.
8. Кабанов М. В., Першин А. А., Пхалагов Ю. А., Ужegov В. Н. Вопросы дистанционного зондирования атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР. 1975. С. 189.
9. Волков А. Н., Пхалагов Ю. А., Ужegov В. Н. // В кн.: VII Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. (Тезисы докл.). Томск: ТФ СО АН СССР. 1983. С. 259.
10. Мак-Картни Э. // Оптика атмосферы. М.: Мир. 1979. 421 с.
11. Арефьев В. Н., Погадаев Б. Н., Сизов Н. И. // Тр. ИЭМ. 1984. Вып. 14(110). С. 86.
12. Шукуров А. Х., Малкевич М. С., Чавро А. И. // Изв. АН СССР. ФАО. 1976. Т. 12. №3. С. 264.
13. Макаров А. С. Исследование закономерностей изменения спектральной прозрачности приземной атмосферы в диапазоне 0,5–25 мкм. Канд. диссертация. Казань, 1979. 185 с.
14. Roberts E. R., Selby J. E., Vibergman L. N. // Appl. Optics, 1976. V. 15. №9. P. 2085.
15. Несмелова Л. И., Творогов С. Д., Фомин В. В. Спектроскопия крыльев линий. Новосибирск: Наука. 1977. 141 с.

16. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. Контур спектральной линии и межмолекулярное взаимодействие. Новосибирск: Наука. 1986. 216 с.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
18 июля 1988 г.

Yu. A. Pkhlagov, V. N. Uzhegov. Statistical Method of Separation of the IR Radiation Extinction Coefficients into Components.

It is shown that the IR radiation extinction can be separated into aerosol and molecular components using a multiple regressive analysis of a set of radiation extinction coefficients $\epsilon(\lambda)$ in the wavelength range $\lambda = 0,55 - 12 \mu\text{m}$. The aerosol extinction coefficient at $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ and the H_2O vapor partial pressure are used as predictors in a two parametric representation of the $\epsilon(\lambda)$ coefficient. A quantitative comparison between the derived dependence of the molecular absorption coefficient at $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ on the H_2O vapor partial pressure and the data obtained under laboratory conditions has been made. These data are shown to be in good mutual agreement. In a real atmosphere this dependence does not in fact differ from a linear one.