

П.Г. Лысенко, В.А. Смеркалов, Л.А. Трифонов, Л.К. Ушакова

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ МЕТОДОМ ОБРАЩЕНИЯ ИНДИКАТРИС ЯРКОСТИ ДНЕВНОГО НЕБА

Излагается упрощенная методика и результаты определения оптических характеристик атмосферного аэрозоля по данным измерений индикатрис яркости дневного неба.

Обсуждаются результаты восстановления спектрально-анализом методом показателя преломления и спектра размеров аэрозольных частиц, содержащихся в атмосфере при измерении индикатрис яркости.

Показывается репрезентативность получаемых данных.

В г. Рыльске в утренние часы 1 и 10 августа 1987 г. при зенитных углах Солнца z_0 от 65 до 77° были проведены измерения индикатрис яркости неба на альмукантаратах Солнца в 7–8 участках спектра в диапазоне длин волн λ от 412 до 2195 нм. Перед началом и после окончания измерений на каждом альмукантарате в каждом спектральном канале проводились измерения яркости эталонного экрана. Кроме того, методом «внеатмосферного блеска» определялась оптическая толщина ослабления солнечного излучения атмосферой («бугеровская толщина»).

Для измерения индикатрис яркости применялся фильтровый фотометр, изготовленный в АФИ АН КазССР, со следующими характеристиками: количество спектральных каналов — 8; угол поля зрения фотометра — 1° ; ожидаемая суммарная среднеквадратическая погрешность измерений индикатрис яркости — 5–7%.

Индикатрисы спектральной яркости $\mu_H(\theta, \lambda)$ определялись по данным совместных измерений спектральной яркости дневного неба на альмукантарате Солнца

$$B(\lambda) = E_0(\lambda) m_0 \mu_H(\theta, \lambda) \exp[-m_0 \tau_{\text{эксп}}(\lambda)] \quad (1)$$

и спектральной яркости эталонного экрана

$$B_{\text{э}}(\lambda) = E_0(\lambda) \frac{\rho_{\text{э}}}{\pi} \exp[-m_0 \tau_{\text{эксп}}(\lambda)], \quad (2)$$

где $E_0(\lambda)$ — внеатмосферная спектральная солнечная освещенность; $m_0 = \sec z_0$ — атмосферная масса в направлении на Солнце; $\rho_{\text{э}}$ — альbedo экрана.

Из соотношения (1) и (2) получается

$$\mu_H(\theta, \lambda) = \frac{\rho_{\text{э}} B(\lambda)}{\pi m_0 B_{\text{э}}(\lambda)}.$$

Измерения индикатрис яркости проводились по программе совместного советско-американского аэрозольного эксперимента с целью определения методами обращения оптических и микрофизических характеристик атмосферного аэрозоля, а именно, оптической толщины и осредненных по высоте спектральных индикатрис рассеяния и спектра размеров аэрозольных частиц.

Из известных в настоящее время экспрессных методов обращения индикатрис яркости, не связанных необходимостью выполнения многократных итераций результатов численного решения уравнения переноса, как это делается, например, в [1], нами был выбран метод, предложенный в [3]. В связи с тем, что метод [3] обрабатывался по модельным данным при точно заданных исходных условиях, необходимо было испытать устойчивость его к помехам путем обработки данных натурных измерений, отягощенных погрешностями.

Сущность метода [3] заключается в следующем (индексы λ при дальнейшем изложении опускаются):

1. По данным измерений индикатрис яркости $\mu_H(\theta)$ рассчитываются «отягощенные» кратными эффектами оптические толщины τ_H и коэффициенты асимметрии индикатрис яркости Γ_H .

$$\Gamma_H = \frac{\int_0^{\pi/2} \mu_H(\theta) \sin^2 \theta d\theta}{\int_{\pi/2}^{\pi} \mu_H(\theta) \sin \theta d\theta}; \quad \tau_H = 2\pi \int_0^{\pi} \mu_H(\theta) \sin \theta d\theta. \quad (3)$$

2. По формуле (предложенной В.А. Смеркаловым)

$$\bar{\tau}_1 = \frac{\ln \left[1 + \tau_H \left(1 - \frac{q}{m_0} \right) \right]}{1,1 + \ln \left[1 + \tau_H \exp \left(-\frac{18\tau_H}{m_0^3} \right) \right]} \quad (4)$$

оценивается в первом приближении искомое значение оптической толщи τ_1 . Входящая в (4) характеристика q -альbedo подстилающей поверхности – оценивается по типу земного покрова. Затем по формуле $\bar{\Gamma}_1 = 1 + \frac{\tau_H}{\bar{\tau}_1}(\Gamma_H - 1)$ оценивается в первом приближении коэффициент асимметрии индикатрисы однократного рассеяния.

3. Задаются три значения оптической толщи $(\tau_1)_i$, а именно: $(\tau_1)_1 = 0,7\bar{\tau}_1$; $(\tau_1)_2 = \bar{\tau}_1$ и $(\tau_1)_3 = 1,5\bar{\tau}_1$. Для этого семейства $(\tau_1)_i$ рассчитывается семейство «отягощенных» оптических толщ

$$(\tau_H)_i = (\tau_1)_i + (\tau_2)_i + (\tau_q)_i,$$

где τ_2 – оптическая толщина кратно рассеянного света, τ_q – оптическая толщина рассеянного света, обусловленного влиянием подстилающей поверхности, имеющей альbedo q .

Расчет составляющих τ_2 и τ_q проводился по алгоритмам аналитической модели поля рассеянного излучения атмосферы [4] $\tau_2 = \tau_1(e^v - 1)$,

$$v = \frac{\tau_1(m_0 + \tau_1^2) + (0,25m_0\tau_1)^3 \left(1 + \frac{0,3}{\tau_1^2} \sqrt{\Gamma_1 - 1} \right)}{2\tau_1 + 0,43m_0};$$

$$\tau_q = \frac{2\tau_1 q}{m_0} \left[1 + \frac{\tau_1 q}{\sqrt{\Gamma_1} + 0,2\sqrt{\tau_1}} \right] \exp \left[\frac{(\tau_1 m_0)^2}{4,8 + \tau_1 m_0} - \frac{\sqrt{\Gamma_1} - 1}{m_0} \right].$$

Как показано в [4], погрешности расчетов индикатрисы яркости по этой модели ($\sigma_\mu = 5,2\%$) соизмеримы с погрешностями измерений их (~5–7%), что оправдывает использование приближенной модели [4] для решения такого рода задач, не обращаясь к трудоемким методам решения уравнения переноса.

4. Аппроксимируется зависимость τ_H от τ_1 в принятых пределах изменения $(\tau_1)_i$, многочленом

$$(\tau_H)_i = a(\tau_1)_i^2 + b(\tau_1)_i + c.$$

Решая полученную систему из трех алгебраических уравнений, определяются значения коэффициентов a , b и c . Полученное ранее по формуле (3) значение τ_H подставляется в формулу

$$\tau_1 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - \tau_H)}}{2a} \quad (5)$$

и определяется значение оптической толщи τ_1 (отрицательный знак перед радикалом принимается при значении $b < 0,006$).

5. Для найденного значения τ_1 уточняются значения и τ_q $\tau_2 = \tau_H - \tau_1 - \tau_q$. Затем по формуле (см. [3])

$$\mu_1(\theta) = \mu_H(\theta) - \frac{\tau_q}{4\pi} - \frac{\tau_2}{4\pi} \frac{W(\theta)}{K} \sqrt{\gamma_H(\theta)} \quad (6)$$

определяются значения коэффициентов направленного атмосферного рассеяния $\mu_1(\theta)$. В формуле (6)

$$W(\theta) = \frac{1}{\gamma_H(60^\circ)} + \frac{3\pi(\Gamma_H - 1)(\sqrt{\gamma_H(\theta)} - 1)}{(\Gamma_H + 1)[4 + \gamma_H(\theta)];}$$

$$K = \frac{1}{2} \int_0^\pi W(\theta) \sqrt{\gamma_H(\theta)} \sin \theta d\theta; \quad \gamma_H(\theta) = 4\pi \frac{\mu_H(\theta)}{\tau_H}.$$

6. По найденным значениям τ_1 и $\mu_1(\theta)$ определяются:
 – оптическая толща аэрозоля $\tau_a = \tau_1 - \tau_R$ (τ_R – толща молекулярного рассеяния);
 – коэффициенты направленного аэрозольного светорассеяния $\mu_a(\theta) = \mu_1(\theta) - \mu_R(\theta)$, где
 $\mu_R(\theta) = 0,7629 \frac{\tau_R}{4\pi} (1 + 0,9324 \cos^2 \theta)$;

– индикатрисы аэрозольного светорассеяния $\gamma_a(\theta) = 4\pi \frac{\mu_a(\theta)}{\tau_a}$;

– коэффициенты асимметрии однократного рассеяния Γ_1 и коэффициенты асимметрии аэрозольного светорассеяния Γ_a .

При решении обратных задач подобного вида обычно накладываеьтся условие «неотрицательности решения». В данном случае, исходя из физического смысла задачи, накладываеьтся условие «существенной положительности» решения, а именно, чтобы $(\gamma_a)_{\min} \geq \frac{1}{3\pi}$. С этой целью находится $(\gamma_a)_{\min}$ и

определяется разность $\Delta = \frac{1}{3\pi} - (\gamma_a)_{\min}$. Если $\Delta \leq 0$, – коррекция решения не проводится, и проводится, если $\Delta > 0$. Для этого определяется $\delta\mu_a = \frac{\tau_a \Delta}{4\pi}$, на которую корректируется решение

$\mu_a^*(\theta) = \frac{\mu_a(\theta) + \delta\mu_a}{1 + \Delta}$ и уточняются значения индикатрисы аэрозольного светорассеяния

$$\gamma_a^*(\theta) = 4\pi \frac{\mu_a^*(\theta)}{\tau_a}$$

По откорректированным значениям $\mu_1^*(\theta) = \mu_a^*(\theta) + \mu_R(\theta)$ рассчитываются уточненные значения коэффициентов асимметрии Γ_1^* и Γ_a^* .

Для проведения расчетов аэрозольных характеристик светорассеяния по приведенным выше алгоритмам в Институте прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова Л.К. Ушаковой была разработана машинная программа «Атмос» на языке ФОРТРАН-4. Расчеты проводились на ЭВМ СМ-2М.

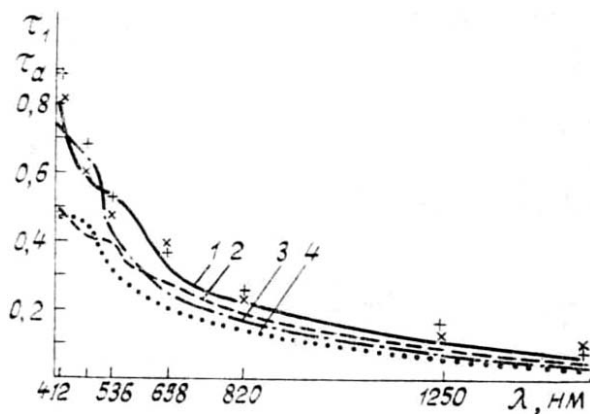


Рис. 1. Спектральный ход оптических толщ $\tau_1(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$. 1, 2 и + – 1 августа; 3, 4 и x – 10 августа, 1, 3 – τ_1 , 2, 4 – τ_a ; +, x – $\tau_{\text{эксп}}$

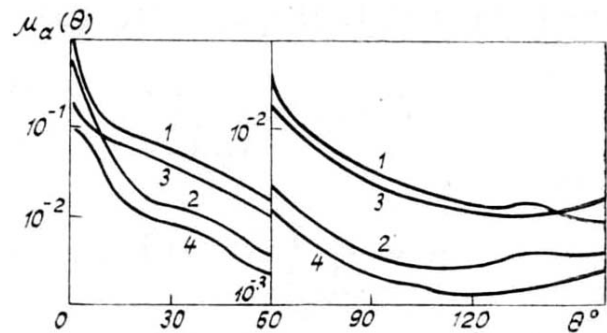


Рис. 2. Коэффициент направленного рассеяния $\mu_a(\theta, \lambda)$, 1, 2 – 1-го августа; 3, 4 – 10-го августа; 1, 3 – $\lambda = 820$ нм, 2 – $\lambda = 1250$ нм, 4 – $\lambda = 1560$ нм

В результате расчетов были определены значения характеристик τ_H , τ , τ_a , Γ_H , Γ_1 , Γ_a , $\mu_H(\theta)$, $\mu_1(\theta)$, $\mu_a(\theta)$, а также значения индикатрис аэрозольного светорассеяния $\gamma_a(\theta)$ на 7–8 участках спектра

для 1-го и 10-го августа, нормированные из условия $\frac{1}{2} \int_0^\pi \gamma_a(\theta) \sin \theta d\theta = 1$.

На рис. 1 представлены результаты определения спектрального хода атмосферных τ_1 и аэрозольных τ_a толщ, а также значения $\tau_{\text{эксп}}$ (крестики).

На рис. 2 в качестве примера приводятся результаты расчета угловых характеристик светорассеяния $\mu_1(\theta)$ и $\mu_a(\theta)$ при $\lambda = 820, 1250$ и 1560 нм. В табл. 1 представлен образец распечатки на ЭВМ получаемых результатов.

Следует отметить, что по методике [3] определяется оптическая толща первичного (чистого) рассеяния τ_1 это позволяет определить весьма важную характеристику – оптическую толщину поглощения

света аэрозолем $\tau_{\text{ан}}$ путем сравнения полученных значений τ_1 с экспериментальными значениями $\tau_{\text{эксп}} = \tau_1 + \tau_{\text{ан}} + \tau_{\text{O}_3}$. Расчеты показывают, что как 1-го, так и 10-го августа 1987 года поглощение света аэрозолем было на уровне фонового, составляя в среднем по спектру $\tau_{\text{ан}} = 0,046$.

Если представить приведенные на рис. 1 значения τ_a в логарифмическом масштабе, то будет видно, что аэрозольная толща 1-го августа изменялась по спектру примерно как $\lambda^{-1,78}$, а 10 августа — как $\lambda^{-2,04}$. В случае распределения аэрозольных частиц по закону Юнге

$$\frac{dN}{d \lg r} = \frac{A}{r^{v^*}}$$

получается, что 1-го августа параметр распределения v^* был равен 3,78, а 10-го августа $v^* = 4,04$. Следовательно, и 1-го и 10-го августа аэрозоль состоял из относительно мелких частиц, крупные частицы, по-видимому, были удалены из атмосферы ежедневными дождями.

10 августа 1987 г., г. Рыльск. $\lambda = 0,82$ мкм; $q = 0,4$; $m_0 = 3,69$; $\tau_H = 0,26$; $\tau_1 = 0,162$; $\tau_a = 0,144$; $\tau_R = 0,019$; $\Gamma_H = 2,895$; $\Gamma_1 = 3,639$; $\Gamma_a = 4,668$

θ°	$\mu_H(\theta)$	$\mu_1(\theta)$	$\mu_a(\theta)$	$\gamma_a(\theta)$
2,0	0,2540	0,21552	0,21326	18,77795
4,0	0,1460	0,11657	0,11431	10,06521
6,0	0,1130	0,08741	0,08516	7,49845
8,0	0,0975	0,07401	0,07177	6,31907
10,0	0,0882	0,06608	0,06385	5,62196
15,0	0,0740	0,05417	0,05198	4,57671
20,0	0,0664	0,04791	0,04577	4,03007
30,0	0,0564	0,03981	0,03781	3,32955
40,0	0,0421	0,02854	0,02673	2,35367
50,0	0,0316	0,02056	0,01894	1,66762
60,0	0,0235	0,01460	0,01315	1,15800
70,0	0,0175	0,01029	0,00899	0,79157
80,0	0,0140	0,00782	0,00661	0,58236
90,0	0,0118	0,00628	0,00511	0,44964
100,0	0,0110	0,00572	0,00452	0,39759
110,0	0,0104	0,00530	0,00400	0,35241
120,0	0,0100	0,00502	0,00358	0,31507
130,0	0,0098	0,00491	0,00328	0,28894
140,0	0,0103	0,00523	0,00342	0,30105
150,0	0,0115	0,00607	0,00408	0,35900
160,0	0,0125	0,00677	0,00463	0,40771

Об этом же говорит и то, что средний по спектру коэффициент асимметрии аэрозольного светорассеяния $\bar{\Gamma}_a$ был ниже обычного: 1-го августа $\bar{\Gamma}_a = 5,75$, 10-го августа $\bar{\Gamma}_a = 5,22$.

Более подробные сведения о микроструктуре аэрозоля были получены при обращении аэрозольных индикатрис светорассеяния в микрофизические характеристики аэрозоля развитым в Институте прикладной геофизики спектрально-анализным методом [5].

Показатель преломления и спектр размеров мелких частиц $\left(\rho = \frac{2\pi r}{\lambda} \leq 3,2\right)$ определялись путем обращения индикатрис рассеяния при значениях углов рассеяния $\theta \geq 75^\circ$. Эта часть индикатрисы наиболее чувствительна к изменению показателя преломления и спектра размеров мелких частиц.

Спектр размеров и показатель преломления крупных частиц определялся путем обращения индикатрис рассеяния при $\theta \leq 90^\circ$.

Результаты обращения показали, что 1-го и 10-го августа атмосферный аэрозоль имел близкие микрофизические характеристики.

На рис. 3 приводится в качестве примера спектр размеров и показатели преломления мелких, средних и крупных частиц атмосферного аэрозоля, определенных путем обращения аэрозольных индикатрис при $\lambda = 0,82$ и $1,64$ мкм, по данным измерений 10-го августа 1987 г.

На этом же рисунке пунктирной линией показано распределение частиц по закону Юнга при среднем значении $v^* = 3$. Видно, что содержание средних и крупных частиц 10 августа в аэрозоле было меньше, чем это обычно наблюдается.

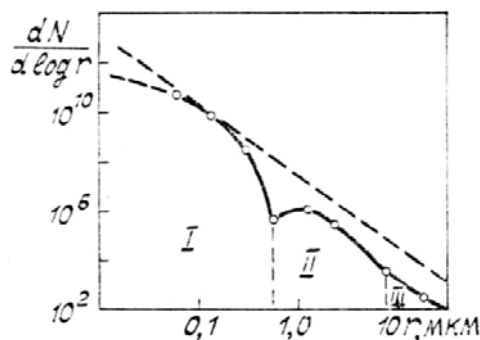


Рис. 3. Функция распределения аэрозольных частиц по размерам $dN/d \log r$; I — $m = 1,53 - 0,007i$, II — $m = 1,43 - 0,005i$, III — $m = 1,34$

При использовании аэрозольных индикатрис, полученных для других пар длин волн (412–824 и 658–1316 нм), микрофизические характеристики аэрозоля получались сравнительно близкими к приведенным на рис. 3 данным: расхождения счетной концентрации оптически активных частиц не превышали 30%, значения действительной части показателя преломления частиц отличались не более чем на 4,5%, мнимой части — не более чем в два раза. По-видимому, указанные отклонения могут служить нижней оценкой возможных погрешностей определения микрофизических характеристик использованными в работе методами.

Обычно при решении обратных задач предполагается, что частицы всех размеров имеют одинаковый показатель преломления. В использованном в работе спектрозональном методе предусматривается возможность определения показателя преломления частиц отдельно для различных размерных фракций аэрозоля. Поэтому представлялось интересным рассмотреть адекватность полученных результатов, соотнести полученные результаты с метеоусловиями во время измерений.

В период проведения аэрозольного эксперимента в г. Рыльске ежедневно шли дожди, и 1-го и 10-го августа отмечалась высокая относительная влажность воздуха. Для этих условий характерны конденсационные механизмы роста частиц (см., например, [2]), при которых с ростом размеров частиц показатель преломления частиц все более приближается к показателю преломления воды ($n = 1,33$).

Именно такого рода изменения показателя преломления частиц получились в результате решения обратной задачи. Действительная часть показателя преломления частиц первой моды (субмикронные частицы, $r < 0,85$ мкм) имеет значение $n_I = 1,53$; второй — $n_{II} = 1,43$; третьей ($r > 7$ мкм) — $n_{III} = 1,34$. При решении обратных задач спектрозональным методом также предполагается, что на участке спектра $\lambda_1 - \lambda_2$, где $\lambda_2 = 2\lambda_1$, комплексный показатель преломления частиц с изменением длины волны не изменяется.

В целом полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Используя развитые в ИПГ инженерные методы экспрессной обработки измерений индикатрис яркости дневного неба представляется возможным восстанавливать осредненные по высоте оптические и микроструктурные характеристики атмосферного аэрозоля. При сочетании фотометрической аппаратуры с компьютером можно получать оптические и микроструктурные характеристики аэрозоля в реальном масштабе времени измерений индикатрис яркости.

2. Методика обращения индикатрис яркости [3] обрабатывалась при допущениях, что:

- свет от подстилающей поверхности отражается по Ламберту;
- альбедо подстилающей поверхности достаточно точно известно;
- выполняется условие азимутальной однородности атмосферы и др.

В реальных условиях проведения эксперимента (особенно, из-за близости города) вряд ли можно рассчитывать, что эти условия выполнялись. Ясно, что имели место случаи возмущения условий обращения, которые, в общем случае, могут приводить к получению некорректных (нефизичных) решений. Результаты обработки показали, что методика [3] весьма устойчива к возможным возмущениям условий обращения.

3. Погрешности восстановления оптической толщи атмосферы τ_1 , обусловленные приближенным характером алгоритмов [3, 4], быстро уменьшаются с уменьшением оптической толщи τ_1 (в красном и ИК-участках спектра, при высотных измерениях). Этим метод обращения [3] выгодно отличается от «бугеровских» методов определения оптической толщи $\tau_{\text{экср}}$. Погрешности определения $\tau_{\text{экср}}$ по Бугеру связаны с погрешностями измерения прозрачности атмосферы σ_P соотношением $\sigma_{\tau_{\text{экср}}} = \frac{\sigma_P}{\tau_{\text{экср}}}$. С

уменьшением $\tau_{\text{экср}}$ погрешность определения оптической толщи $\delta\tau_{\text{экср}}$ быстро возрастает. Так, принимая для экспедиционных условий $\sigma_P = 2\%$, получаем, что при уменьшении τ_B от 0,1 до 0,05, погрешность определения $\tau_{\text{экср}}$ возрастает с 20 до 40%. Погрешность же определения τ_1 методом обращения индикатрис яркости, связанная с приближенным характером алгоритмов [3, 4], при этих условиях

уменьшается до единиц процентов. Кроме того, в отличие от «долгого» метода Бугера, метод обращения [3] является «коротким», не связан с длительными измерениями, применим при оптически нестабильной атмосфере, поэтому он был выбран для обработки результатов измерений.

4. В связи с недостаточной детерминированностью исходных условий обращения (не учитывается неортоотропность подстилающей поверхности, не точно задается ее альbedo и измеряются индикатрисы яркости и др.) использование более сложных в вычислительном плане методов типа [1, 6] для решения такого рода обратных задач вряд ли является оправданным.

Авторы считают своим долгом поблагодарить Н.А. Зайцеву за помощь в организации и Н.В. Смоленскую за помощь в проведении измерений.

1. Антюфеев В. С., Иванов А. И., Лившиц Г. Ш., Михайлов Г. А. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1980. Т. 16. № 2. С. 146–154.
2. Лактионов А. Г. Равновесная гетерогенная конденсация. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 160 с.
3. Смеркалов В. А. // Труды ИПГ. 1987. Вып. 68. С. 109–114.
4. Смеркалов В. А. Аналитическая модель поля рассеянного излучения свободной атмосферы Земли. М., 1988. 61 с. Деп. в ВИНТИ 14.04.1988. № 2885-В88.
5. Смеркалов В. А. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1984. Т. 20. № 10. С. 876–877.
6. Тихонов А. И., Арсенин В. А. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 223 с.

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова
Астрофизический институт АН Каз. ССР имени академика В.Г. Фесенкова

Поступила в редакцию
27 ноября 1989 г.

P. G. Lysenko, V. A. Smerkalov, L. A. Trifonov, L. K. Ushakova. Investigation of the Atmospheric Aerosol by Inverting the Angular Distribution Function of the Day Sky Background.

The paper presents a simplified technique for determination of the aerosol optical characteristics from measurement data on the day sky background angular distribution.

Some results on restoration of the particulate matter refractive index and aerosol size spectra using spectrozonal method are presented. Obtained data are shown to be representative.