

Л.Н. Павлова

### О ПРИМЕНЕНИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ АЭРОЗОЛЯ

В статье методом численного моделирования исследуется влияние показателя преломления вещества частиц на результат определения функции распределения частиц по размерам с помощью фотоэлектрического прибора с боковым приемом рассеянного излучения. Прибор работает в комплекте с 8-канальным амплитудным анализатором; минимальный регистрируемый сигнал соответствует сигналу от латексов с радиусом  $r = 0,1$  мкм.

Фотоэлектрический метод определения размеров и концентрации частиц заключается в освещении их пучком света, приеме световых импульсов от каждой частицы в некотором диапазоне углов рассеяния, в счете импульсов и анализе значений их амплитуды. Если известна взаимосвязь амплитуды импульсов с размерами частиц, можно определить последние для частиц, проходящих через рабочий объем прибора. Однако интерпретация полученных данным методом результатов измерений сталкивается с целым рядом трудностей. Влияние различных факторов на точность определения микроструктурных характеристик дисперсной среды неоднократно обсуждалось учеными (например, [1, 6]).

Одной из причин, вызывающих трудности в интерпретации результатов измерений, является то обстоятельство, что градуировка прибора (т. е. установление взаимосвязи значений амплитуды импульсов с радиусом частиц) осуществляется обычно либо калиброванными латексами с показателем преломления  $m = 1,49$  или  $1,58$  [2,6], либо каплями трансформаторного масла с  $m = 1,50$  [1], но часто исследуются частицы с неизвестным  $m$ . Кроме того, среда (например, атмосфера) может содержать смесь частиц различного химического состава.

В [1, 3, 6] было показано, что в этом случае невозможно получить высокую разрешающую способность прибора, а ошибки определения размеров отдельных частиц могут доходить до 350%, особенно при использовании лазерных спектрометров. Однако при использовании фотоэлектрических приборов для исследования атмосферного аэрозоля определение микроструктурных характеристик производится в так называемом латексном эквиваленте.

В настоящей статье путем численного эксперимента исследуется искажение функций  $f(r)$  распределения по размерам частиц из различных веществ, определяемых с помощью фотоэлектрического прибора, проградуированного латексами с  $m = 1,49$ . Расчеты проводились для наиболее распространенной схемы прибора с боковым приемом рассеянного излучения (угол  $\Theta = 90^\circ \pm 10^\circ$ ). Предполагалось, что: 1) среда содержит однородные частицы сферической формы; 2) частицы освещаются пучком лазерного излучения с длиной волны  $\lambda = 0,63$  мкм или «белого» света (угол сходимости  $2\gamma = 10^\circ$ ).

Задача решалась следующим образом. Вначале были выполнены расчеты по теории Ми коэффициентов направленного светорассеяния  $F(\Theta, r, m)$  для частиц различного химического состава с радиусами  $r = 0,01$  (0,01) 5,0 мкм при освещении их излучением с  $\lambda = 0,63$  мкм и «белым» светом. Учет геометрии схемы измерения проводился по формулам [5].

Результаты для «белого» света получены интегрированием по  $\lambda$  от 0,38 до 0,83 мкм (с  $\Delta\lambda = 0,05$  мкм) без учета спектральных характеристик источника и приемника, так как в этом случае осуществляется наибольшее сглаживание осцилляций интенсивности рассеянного излучения (по сравнению со случаем монохроматического освещения).

Расчеты проводились для: а) латексов,  $m = 1,49$ ; б) растворимой фракции атмосферного аэрозоля,  $m = 1,53 - 0,006 i$  [4]; в) воды,  $m = 1,33$ ; г) пыли  $m = 1,53 - 0,008 i$  [4]; д) сажи  $m = 1,75 - 0,43 i$  [4].

Результаты расчетов  $F(\theta, r, m)$  для лазерного излучения с  $\lambda = 0,63$  мкм показаны на рис. 1 (кривая для пыли практически совпадает с кривой 2 и не приводится). Несмотря на осреднение интенсивности рассеянного излучения по телесному углу приемника, для непоглощающих и слабопоглощающих частиц с  $r > 0,7$  мкм, наблюдается осцилляция значений  $F(\theta, r, m)$ , отмечаемая ранее в [6]. Для частиц сажи она отсутствует вследствие существенного поглощения света. В случае «белого» света осцилляция значительно сглажена, хотя некоторое различие кривых  $F(\theta, r, m)$  для разных  $m$  сохраняется (эти кривые неоднократно приводились, например, в [1]). Рассмотрим работу прибора в комплекте с 8-канальным анализатором импульсов.

Диапазон значений  $\lg F(\theta, r, m)$  для  $m = 1,49$ , соответствующий трем порядкам изменения  $F(\theta, r, m)$ , разбивался на 7 равных интервалов, как показано на рис. 1, и определялись пороговые значения  $F(r)$  8-канального анализатора импульсов ( $\Pi_1 - \Pi_8$ ). Пороговое значение 1-го канала анализатора  $\Pi_1$  выбиралось равным  $F(r)$  для частиц латекса с  $r = 0,1$  мкм. Из рис. 1 видно, что на один и тот же интервал значений  $\Delta F_k(r)$ , соответствующих  $k$ -му каналу анализатора, приходится разные интервалы  $\Delta r_k$  радиусов частиц с разными  $m$ .

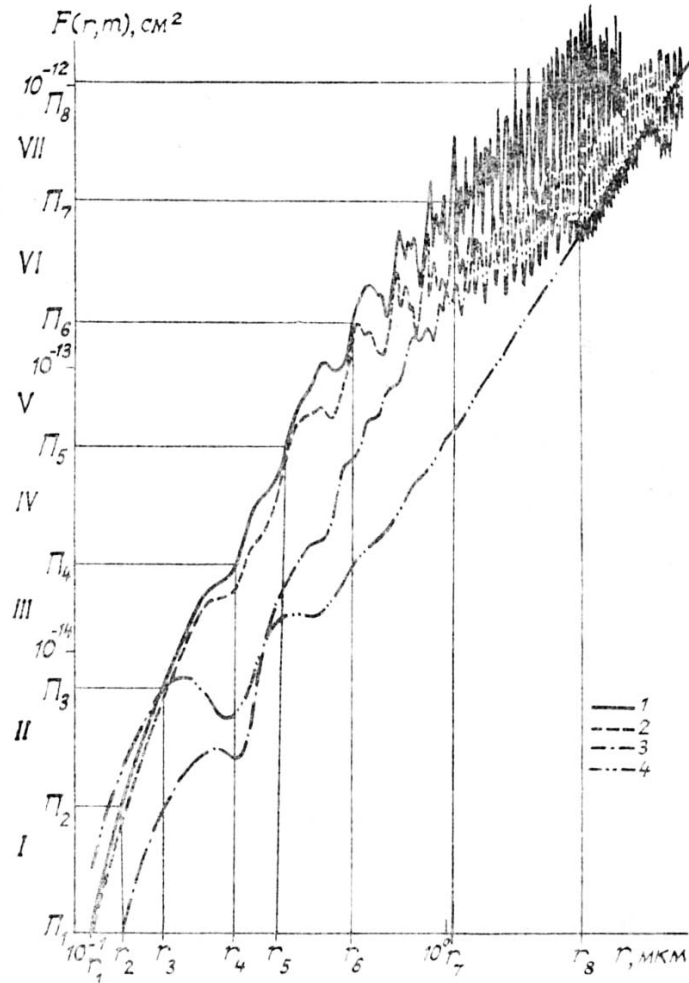


Рис. 1. Зависимость коэффициента направленного светорассеяния при  $\Theta = 90^\circ \pm 5^\circ$  от радиуса частиц, с разными показателями преломления: 1 —  $m = 1,49$ ; 2 —  $m = 1,53 - 0,006i$ ; 3 —  $m = 1,33$ ; 4 —  $m = 1,75 - 0,43i$ . I—VII — диапазоны значений  $F(r, m)$ , соответствующих 1—7 каналам анализатора;  $r_1 - r_8$  — пороговые значения радиусов частиц латексов для каждого канала

Моделирование работы 8-канального анализатора проводилось следующим образом. Предполагалось, что среда содержит частицы с логнормальным распределением по размерам:

$$f(r) = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma \cdot r} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(r_m/r)}{\ln \sigma} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $N_0$  — общее число частиц в единице объема;  $r_m$  — медианный (или средний геометрический) радиус;  $\sigma$  — параметр, характеризующий ширину распределения.

Значения  $r_m = 0,03; 0,15; 0,25; 0,5$  и  $1,0$  мкм, а  $\sigma = 2$  и  $3$ . Для каждого заданного радиуса от  $r = 0,01$  мкм до  $r = 20 \cdot r_m$  определялась  $F(r, m)$  и число частиц  $\Delta n = f(r) \cdot \Delta r$  в заданной среде, имеющих радиусы от  $r$  до  $r + \Delta r$  при  $\Delta r = 0,01$  мкм. Сумма значений  $\Delta n$  для тех частиц, для которых  $F(r, m) < \Pi_1$  определяет число импульсов, не зарегистрированных прибором. Импульсы, для которых  $\Pi_k \leq F(r, m) < \Pi_{k+1}$ , регистрируются в  $k$ -м канале анализатора. При  $F(r, m) \geq \Pi_8$  все импульсы регистрируются в 8-м канале.

Результаты расчетов для случая освещения частиц лазерным излучением с  $\lambda = 0,63$  мкм представлены в табл. 1 и 2 для  $\sigma = 2$  и  $3$  соответственно. К каналам 1—8 отнесены доли импульсов  $n_k = N_k/N_0$ , приходящихся на каждый канал, от общей заданной концентрации частиц  $N_0$ . В последней строке табл. 1 приводятся значения  $\sum_1^8 n_k$ . Из таблицы видно, что при одинаковых функциях

распределения частиц по размерам распределения импульсов по каналам различны для разных веществ. Для того чтобы от этих данных перейти к распределению по размерам, необходимо определить граничные значения радиусов частиц  $r_k$  для каждого канала.

Таблица 1

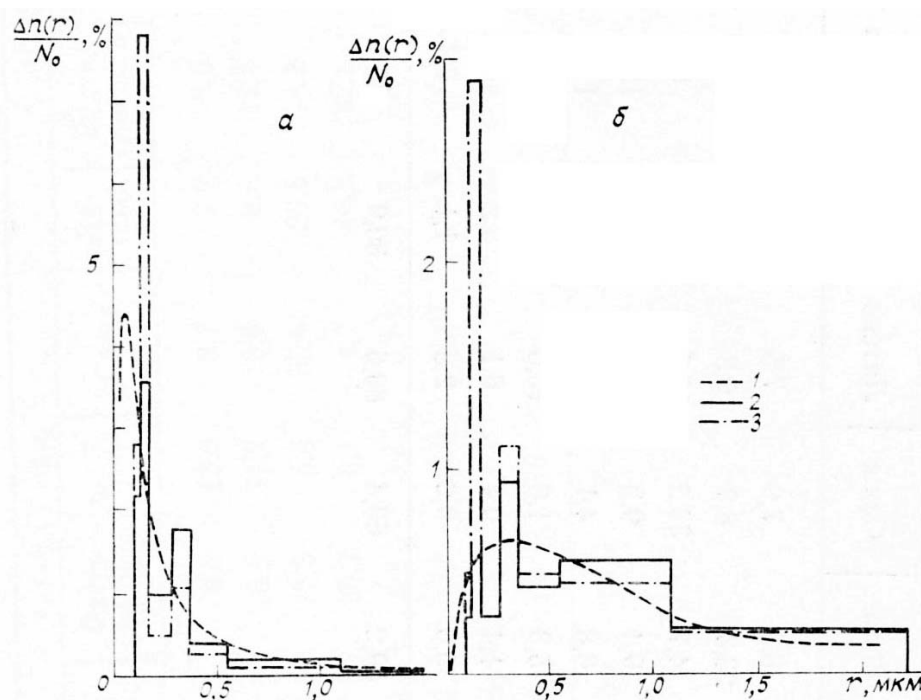
Доли импульсов  $\Delta n_k/N_0$  (%), зарегистрированные в каждом канале анализатора при разных  $r_m$  и при  $\sigma = 2$ 

№ канала	$r_k$ , мкм	$r_m=0,03$ мкм				$r_m=0,15$ мкм				$r_m=0,25$ мкм				$r_m=0,5$ мкм			
		Латекс	Раств. фракция	Вода	Сажа	Латекс	Раств. фракция	Вода	Сажа	Латекс	Раств. фракция	Вода	Сажа	Латекс	Раств. фракция	Вода	Сажа
1	0,10	2,8	2,2	1,5	3,1	14,1	9,6	13,0	9,7	7,7	5,0	8,5	4,6	1,4	0,9	2,0	0,7
2	0,13	1,1	1,7	1,1	2,0	12,3	16,8	34,2	13,6	8,6	11,4	35,9	8,2	2,3	2,8	17,1	1,7
3	0,16	0,78	0,61	0,03	1,5	25,9	15,5	5,4	50,6	26,6	14,2	8,9	61,9	12,0	5,4	7,3	41,6
4	0,26	0,08	0,25	0,02	0,0	10,7	20,3	8,1	4,7	16,8	27,6	17,4	14,6	13,0	18,2	21,2	30,2
5	0,35	0,02	0,02	0,0	0	8,1	8,8	3,3	0,73	18,5	19,4	10,7	4,0	24,3	24,6	23,0	17,5
6	0,55	0	0	0	0	3,1	3,4	0,9	0,07	11,8	13,2	5,0	0,7	33,3	38,7	21,8	6,1
7	1,09	0	0	0	0	0,2	0,1	0,0	0	1,6	1,0	0,5	0,1	10,7	7,7	5,5	1,3
8	2,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0	2,1	0,7	0,3	0,2
$\Sigma$ , %	—	4,78	4,78	2,65	6,6	74,4	74,5	64,9	79,3	91,7	91,8	86,9	94,1	99,1	99,0	98,2	99,3

Таблица 2

Доли импульсов  $\Delta n_k/N_0$  (%), зарегистрированные в каждом канале анализатора при разных  $r_m$  и при  $\sigma = 3$ 

№ канала	$r_k$ , мкм	$\bar{r}_k$ , мкм	$r_m=0,15$ мкм				$r_m=0,25$ мкм				$r_m=0,5$ мкм			
			Латекс	Раств. фракция	Вода	Сажа	Латекс	Раств. фракция	Вода	Сажа	Латекс	Раств. фракция	Вода	Сажа
1	0,10	0,115	9,5	6,6	8,3	7,0	7,5	5,1	7,0	5,2	3,8	2,5	3,9	2,4
2	0,13	0,145	7,8	10,7	23,3	8,9	6,8	9,2	23,5	7,3	4,0	5,3	17,4	3,9
3	0,16	0,21	17,4	10,0	4,7	38,2	17,5	9,7	5,7	42,0	12,7	6,5	5,3	34,9
4	0,26	0,305	9,0	15,6	9,4	9,2	10,8	17,7	12,8	14,7	9,8	14,9	13,9	19,8
5	0,35	0,45	10,0	10,5	6,8	4,1	14,0	14,5	11,0	8,3	15,7	16,0	15,0	15,3
6	0,55	0,82	8,9	10,2	5,3	1,6	15,6	18,4	10,7	4,0	24,4	29,4	20,0	9,7
7	1,09	1,65	2,7	2,0	1,4	0,4	6,1	5,2	4,3	1,6	13,8	12,9	11,7	5,1
8	2,21	> 2,21	0,5	0,1	0,0	0,0	2,3	1,1	0,4	0,4	9,0	5,6	3,3	3,2
$\Sigma$ , %	—	—	65,8	65,7	59,2	69,4	80,6	80,9	75,4	83,5	93,2	93,1	90,5	94,3

Рис. 2. Исходная (1) и определяемые прибором функции распределения частиц по размерам (2 — растворимая фракция, 3 — вода) при освещении частиц излучением с  $\lambda = 0,63$  мкм. а —  $r_m = 0,15$  мкм,  $\sigma = 3$ ; б —  $r_m = 1,0$  мкм,  $\sigma = 3$

Предположим, что эти значения определены для латексов с  $m = 1,49$  (см. табл. 1), и измерение всех других частиц производится в так называемом латексном эквиваленте. На рис. 2 наглядно показано, как искажается распределение частиц по размерам  $\Delta n(r)$  при изменении химического состава частиц, если при обработке результатов не вносить поправку на изменение  $m$  (а также, если значения  $m$  не известны). Значения  $\Delta n(r)/N_0$  на рис. 2 приведены к интервалам  $\Delta r = 0,01$  мкм. Даже для растворимой фракции аэрозоля наблюдается искажение спектра размеров частиц, а именно: появление ложных максимумов, несмотря на то, что кривая  $F(r, m)$  для них близка к кривой для латекса.

На рис. 3 показаны гистограммы размеров частиц воды и растворимой фракции, определенные в латексном эквиваленте при облучении частиц «белым» светом, когда кривые  $F(r, m)$  сглажены. Некоторое искажение спектра размеров наблюдалось при исследовании капель воды. Из полученных гистограмм были определены различные моменты функции распределения частиц по размерам. Расчет моментов производился по следующим выражениям:

$$\text{средний радиус } \bar{r}_n = \frac{\sum_1^7 (N_k \cdot \bar{r}_k)}{\sum_1^7 N_k};$$

$$\text{среднеквадратический радиус } r_{2n}^2 = \frac{\sum_1^7 (N_k \cdot \bar{r}_k^2)}{\sum_1^7 N_k};$$

$$\text{среднекубический радиус } r_{3n}^3 = \frac{\sum_1^7 (N_k \cdot \bar{r}_k^3)}{\sum_1^7 N_k};$$

$$\text{объемная концентрация частиц } V_n = \frac{4}{3} \pi r_{3n}^3 \cdot \sum_1^8 N_k \text{ мкм}^3/\text{см}^3; \text{ счетная концентрация частиц}$$

$N_n = \sum_1^8 N_k$ ; где  $\bar{r}_k$  — средние значения радиусов латекса, соответствующих  $k$ -му каналу.

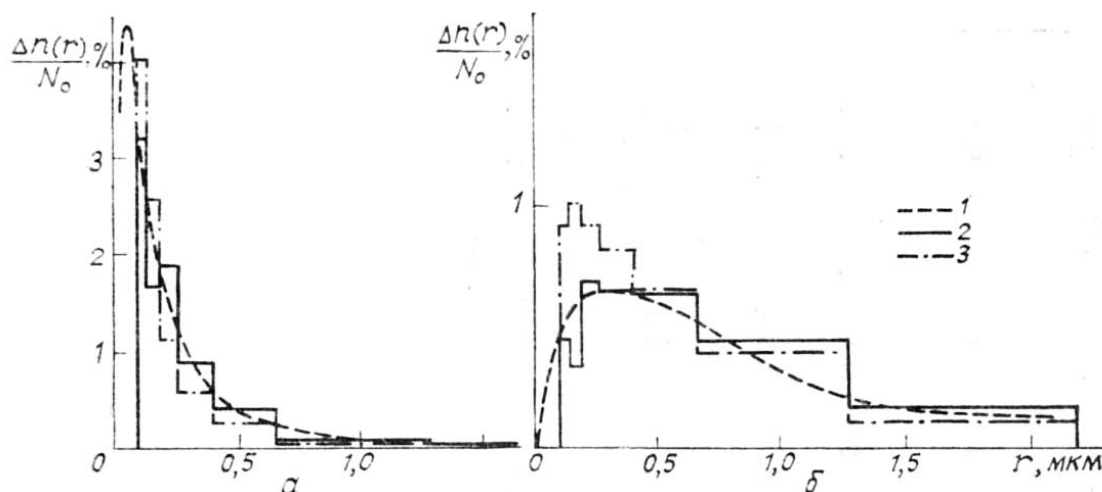


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но при освещении частиц «белым» светом

Данные канала № 8 не использовались в расчете  $r_n$ ,  $r_{2n}$  и  $r_{3n}$ , поскольку значение  $\bar{r}_8$  при исследовании аэрозоля с неизвестной  $f(r)$  не известно.

В табл. 3 приводятся отношения расчетных моментов распределения частиц по размерам (которые мы будем называть измеренными) к их действительным значениям при разных  $r_m$  и  $\sigma = 3$ . Из этих данных видно, что ограниченность рабочего диапазона анализатора импульсов приводит к тому, что даже для частиц с  $m = 1,49$  наблюдается отличие измеренных моментов распределения от действительных. При малых  $r_m = 0,03$  мкм оно вызвано тем, что большая часть мелких частиц с  $r < 0,1$  мкм не регистрируется прибором ( $N_n/N_0 \approx 14\%$ ) и вследствие этого существенно завышаются средние радиусы частиц. Однако объемная концентрация частиц в этом случае близка к действительной:  $V_n/V \approx 1,2$ . При больших  $r_m$ , несмотря на то, что модальный радиус  $r_{\text{мод}}$  находится в диапазоне радиусов, охватываемом прибором, даже небольшая доля частиц с  $r > r_8$  (не учитываемая в определении средних радиусов) приводит к занижению  $r_n$ ,  $r_{2n}$  и  $r_{3n}$  и, как следствие, к занижению  $V_n$ . Отличие измеренных моментов распределения в случае растворимой фракции аэрозоля и особенно в случае водяных капель от аналогичных моментов для латексов вызвано отличием показателей преломления. Рассмотренный нами анализатор позволяет наиболее точно определять средние радиусы частиц растворимой фракции аэрозоля и воды при  $r_m = 0,15 \div 0,25$  мкм ( $\sigma = 3$ ). При больших  $r_m$ , а также в случае более широких распределений необходимо расширять рабочий диапазон анализатора.

Отношение измеренных моментов  $f(r)$  к действительным при использовании «белого» света

	Частицы с $m=1,49$					Растворимая фракция					Вода				
$r_m$ , МКМ	0,03	0,15	0,25	0,5	1,0	0,03	0,15	0,25	0,5	1,0	0,03	0,15	0,25	0,5	1,0
$r_{мод}$ , МКМ	0,009	0,045	0,075	0,15	0,3	0,009	0,045	0,075	0,15	0,3	0,009	0,045	0,075	0,15	0,3
$\frac{N_n}{N_0}$ , %	14,4	65,8	80,8	93,1	98,1	14,4	65,8	80,8	93,1	98,1	9,4	56,3	73,3	89,3	96,8
$\frac{\bar{r}_n}{r}$	3,5	1,4	1,1	0,96	0,47	3,6	1,3	1,1	0,78	0,52	3,0	1,1	0,87	0,62	0,43
$r_{2n}/r_2$	2,6	1,2	0,95	0,64	0,40	2,7	1,2	0,92	0,62	0,40	2,1	0,98	0,77	0,52	0,34
$V_n/V$	1,2	0,93	0,43	0,13	0,03	1,3	0,77	0,40	0,12	0,03	0,39	0,40	0,23	0,08	0,02

Таким образом, путем численного эксперимента показано, что при использовании лазера на  $\lambda = 0,63$  мкм в фотоэлектрических анализаторах аэрозолей с боковым приемом рассеянного излучения и при их градуировке латексами определяемое прибором распределение частиц по размерам существенно зависит от вещества исследуемых частиц. При известном  $m$  от значения  $r_k$  для латексов можно перейти к  $r_k$  для данного вещества, пользуясь расчетными кривыми, аналогичными кривым на рис. 1. При исследовании аэрозолей, показатель преломления которых не известен и изменяется при изменении относительной влажности воздуха [7], на измеренной в «латексном эквиваленте»  $f(r)$  могут появиться ложные максимумы. Поэтому лучше использовать освещение частиц «белым» светом. Однако следует иметь в виду, что и в этом случае определяемые прибором моменты распределения  $f(r)$  могут существенно отличаться от действительных, как показано в табл. 3.

Несмотря на то, что расчеты выполнены для конкретной схемы прибора, отмеченные выше закономерности в той или иной степени присущи и другим схемам.

1. Беляев С. П., Никифорова Н. К., Смирнов В. В., Щелчков Г. И. Опико-электронные методы изучения аэрозолей. М.: Энергоиздат, 1981. 230 с.
2. Бисярин В. П., Бисярина И. П., Третьяков Г. К. // Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. М.: 1986. С. 231–242.
3. Козлов В. С., Польшкин В. В., Фадеев В. Я. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. № 4. С. 428–431.
4. A Preliminary Cloudless Standard Atmosphere for Radiation Computation. Radiation Commission. Boulder, Co. USA, 1984. WSP-112. 58 p.
5. Hodgkinson J., Greenfield J. // Appl. Opt. 1965. V. 4. № 11. P. 1463–1474.
6. Qwenzel H. // Appl. Opt. 1969. V. 8. № 1. P. 165–169.
7. Takamura T., Tanaka M., Nakajima T. // J. Meteorol. Soc. Jap. 1984. V. 62. № 3. P. 573–582.

Институт экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун»,  
Госкомгидромет СССР, г. Обнинск

Поступила в редакцию  
24 июля 1989 г.

#### L. N. Pavlova. On the Use of Photoelectrical Device for Measuring Aerosol Microstructure.

The method of numerical modeling is used for investigating the effects of particle refractive index on the determination of the particle size distribution function by photoelectrical device with reception of scattered radiation at  $90^\circ$ . The device is provided an 8 channel amplitude analyzer. The minimum detectable signal corresponds to a signal from a latex particle with the radius of  $0,1 \mu\text{m}$ .