

Н.Д. Цветкова, В.А. Юшков

## АЭРОСТАТНЫЕ ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СТРАТОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ

В статье проводится краткое описание аэростатного импактора, результаты измерения вертикального профиля счетной концентрации и распределения аэрозольных частиц по размерам в диапазоне высот 10 ... 30 км. полученные в г. Рыльске летом 1987—1988 гг.

Многие расчеты оптических, термодинамических, физико-химических параметров и характеристик стратосферы были сделаны на базе модельных представлений о стратосферном аэрозоле. В свою очередь, модельные представления нуждаются в экспериментальной проверке и уточнении на основе прямых измерений стратосферного аэрозоля. Наиболее информативными в этом плане являются импакторные измерения аэрозольной компоненты, которые позволяют определить счетную концентрацию аэрозольных частиц и их распределение по размерам, морфологические характеристики и элементный состав частиц. Прямые импакторные измерения стратосферного аэрозоля достаточно малочисленны, поэтому новые данные измерений могут быть полезны и интересны широкому кругу исследователей атмосферы.

Аспирация аэрозольных частиц в импактор осуществляется через тонкостенную трубку с внутренним диаметром 1,8 мм и внешним диаметром 2 мм. Под выходным отверстием трубки на расстоянии 1 мм располагается вращающаяся подложка для осаждения аэрозольных частиц из газового потока. Сбор частиц осуществляется на медные сеточки с покрытием из тонкой углеродной пленки, обычно используемые в электронной микроскопии. Перемещение подложки под соплом, а также включение и выключение насоса на заданной высоте полета аэростата осуществляются автоматически.

Электронно-микроскопический анализ полученных проб позволяет определить счетную концентрацию аэрозольных частиц на единицу площади подложки в любом заданном интервале их размеров, а также получить морфологическое описание собранных частиц.

Расход воздуха через прибор в диапазоне давлений 10 ... 265 Мбар определялся на лабораторной установке по перепаду давлений на концах аспирационной трубки. Расчеты показали, что объемный расход воздуха через входное сечение аспирационной трубки изменяется от 15,4 л/мин на высоте 10 км до 3,4 л/мин на высоте 30 км.

Таблица 1

Вертикальное распределение частиц по размерам  $N(r > r_0)$ ,  $\text{см}^{-3}$   
(г. Рыльск, 03.09.87 г.).

H, км $r_0$ , мкм	14,8	18,8	22,0	25,5	26,2
0,05	1,5( 0 )	2,3( 0 )	7,0(—1)	1,7( 0 )	1,0( 0 )
0,1	3,0(—1)	2,9(—1)	2,9(—1)	7,6(—1)	1,8(—1)
0,15	9,5(—2)	1,9(—1)	1,9(—1)	5,4(—1)	7,9(—2)
0,2	7,1(—2)	1,3(—1)	1,3(—1)	3,5(—1)	2,7(—2)
0,25	4,7(—2)	5,2(—2)	6,8(—2)	2,0(—1)	7,8(—3)
0,3	2,5(—2)	8,1(—3)	3,0(—2)	5,2(—2)	3,1(—3)
0,35	1,4(—2)	4,6(—3)	1,1(—2)	2,1(—2)	—
0,4	9,0(—3)	—	7,6(—3)	6,5(—3)	—
0,45	7,6(—3)	—	4,4(—3)	—	—
0,5	2,8(—3)	—	2,5(—3)	—	—

Примечание: Число в скобках обозначает степень 10.

Для оценки эффективности инерционного осаждения аэрозольных частиц на подложку использовались результаты численных расчетов уравнений движения частиц в поле скоростей, возникающем при выходе разреженного газа из сопла [1]. Как показывают расчеты, для импактора на высоте 15 км частицы с радиусом 0,05 мкм осаждаются с эффективностью 50, а частицы с радиусом более

0,1 мкм — с эффективностью 100%. Выше 18 км частицы с радиусом больше 0,05 мкм осаждаются также со 100%-й эффективностью.

Коэффициент эффективности аспирации аэрозольных частиц в тонкостенную трубку рассчитывался в рамках модели точечного стока в равномерном прямоугольном потоке [2]. В условиях аэростатного эксперимента для частиц с радиусом меньше 1 мкм коэффициент аспирации близок к 100% на всех высотах забора проб.

Погрешность измерений концентрации аэрозольных частиц с радиусом больше 0,1 мкм не превышает 60% на всех высотах измерения, а для более мелких частиц может достигать фактора 2.

Результаты измерений вертикального распределения аэрозольных частиц с  $r \geq 0,05$  мкм в диапазоне высот 13 ... 27 км, проведенных в сентябре 1987 г. в г. Рыльске, приведены в табл. 1. Данные получены во время подъема аэростата, а также в дрейфе на максимальной высоте подъема и осреднены по 3-километровым слоям (в таблицах указана высота середины слоя). Общая концентрация частиц меняется в пределах 1,0 ... 2,3 см<sup>-3</sup>, а для частиц с  $r < 0,3$  мкм наблюдается относительный максимум концентрации на высоте 25,5 км. На рисунке (а) приведены распределения частиц по размерам на разных высотах.

Полученные спектры размеров частиц близки к степенному закону распределения Юнге  $dN/dlgr = Cr^{-v}$  (или к суперпозиции степенных законов) и достаточно круто спадают в области больших размеров, так что частицы с размером  $r > 1$  мкм практически не наблюдаются. Параметр  $v$  меняется с высотой случайным образом, и его значения на разных высотах лежат в диапазоне от 2,2 до 5,3.

Результаты измерений вертикального распределения аэрозольных частиц в июне 1988 г. приведены в табл. 2 и на рисунке (б, в). Данные получены во время подъема аэростата в диапазоне высот 10 ... 30 км и осреднены по 1,5-километровым слоям. Общая концентрация частиц с  $r \geq 0,05$  мкм меняется от 0,4 до 3,0 см<sup>-3</sup>. По сравнению с данными 1987 г. на высотах  $H > 20$  км увеличилась концентрация крупных частиц и их доля в распределении частиц по размерам. Значения параметра  $v$  меняются в пределах от 1,7 до 3,9 на разных высотах.

Таблица 2

Вертикальное распределение частиц по размерам  $N(r > r_0)$ , см<sup>-3</sup>  
(г. Рыльск, 21.06.88 г.).

$H$ , км $r_0$ , мкм	11,3	12,6	13,9	15,3	18,5	20,2	21,9	23,7	25,3	27,0	28,4
0,05	4,2(-1)	7,5(-1)	1,1	1,5	1,7	3,1	3,0	3,0	3,1	3,0	1,7
0,1	3,2(-1)	2,1(-1)	3,0(-1)	4,8(-1)	6,7(-1)	1,3	1,6	8,2(-1)	7,3(-1)	1,3	1,2
0,15	2,5(-1)	1,1(-1)	1,8(-1)	2,8(-1)	4,7(-1)	8,8(-1)	1,4	5,4(-1)	4,1(-1)	8,8(-1)	8,8(-1)
0,2	1,9(-1)	5,0(-2)	1,2(-1)	1,8(-1)	3,5(-1)	7,1(-1)	1,2	4,2(-1)	3,2(-1)	7,2(-1)	7,1(-1)
0,25	1,2(-1)	2,4(-2)	6,1(-2)	9,6(-2)	2,6(-1)	5,6(-1)	1,0	3,0(-1)	2,5(-1)	5,9(-1)	5,3(-1)
0,3	2,4(-2)	6,2(-3)	2,7(-2)	2,6(-2)	1,0(-1)	3,0(-1)	5,7(-1)	1,5(-1)	1,4(-1)	3,6(-1)	2,5(-1)
0,35	5,9(-3)	—	1,0(-2)	6,8(-3)	3,6(-2)	1,7(-1)	3,5(-1)	8,3(-2)	8,2(-2)	2,4(-1)	1,2(-1)
0,4	—	—	6,7(-3)	1,4(-3)	7,2(-3)	8,6(-2)	1,9(-1)	6,1(-2)	3,8(-2)	1,6(-1)	4,7(-2)
0,45	—	—	—	—	1,4(-3)	7,0(-2)	1,3(-1)	5,0(-2)	2,6(-2)	1,3(-1)	4,0(-2)
0,5	—	—	—	—	—	4,0(-2)	8,3(-2)	2,8(-2)	2,1(-2)	8,3(-2)	—

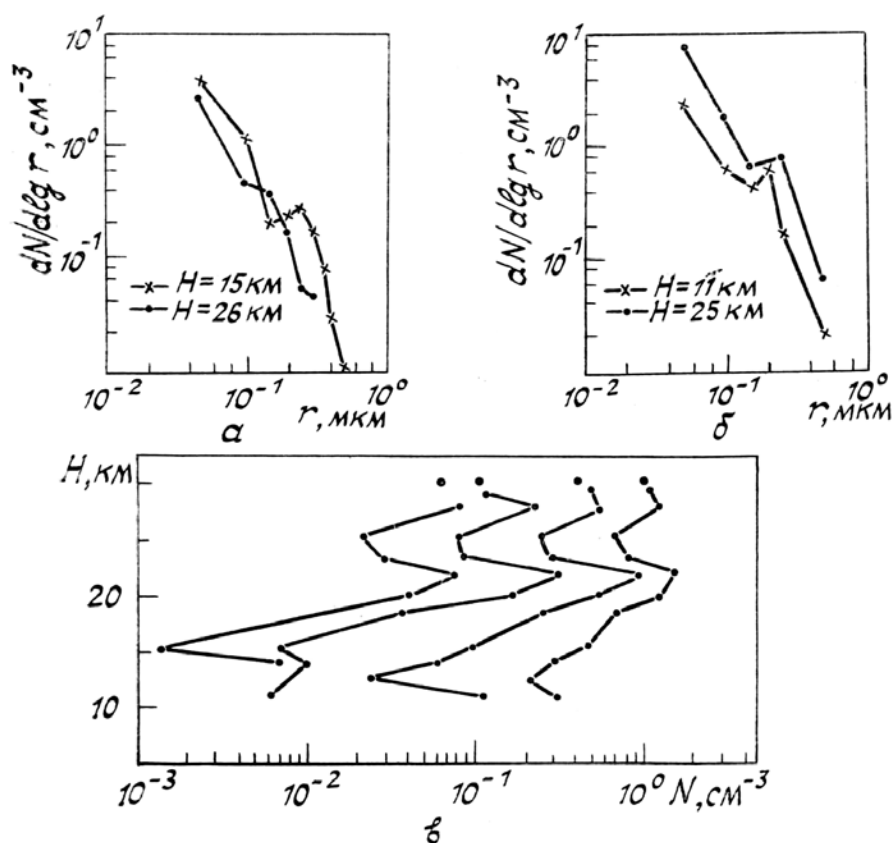
Примечание: Число в скобках обозначает степень 10.

Морфологический состав частиц практически одинаков во всем диапазоне размеров частиц и высот измерений в обоих пусках. Более 90% собранных частиц имеют форму капов, существенно неоднородную оптическую плотность и легко испаряются под лучом электронного микроскопа, что может быть причиной искажения спектров размеров частиц, реально существующих в стратосфере, при лабораторной обработке аэрозольных проб. Многие мелкодисперсные частицы имеют гало. Частицы других морфологических типов составляют не более 3–4% от общего числа частиц. Среди них наиболее часто встречаются оптически плотные крупные частицы неправильной формы, реже — иглы, цепочки, многослойные частицы.

Следует отметить, что представленные экспериментальные данные о концентрации аэрозольных частиц в нижней стратосфере занижены по сравнению с частью данных, полученных к настоящему времени другими методами [3, 4]. Наибольшее расхождение наблюдается на высотах ниже 20 км с данными оптических методов, в частности, фотоэлектрического счетчика. В этом случае результаты измерений могут отличаться более чем на порядок величины. В то же время расхождение с данными импакторных измерений других авторов [4] невелико и находится практически во всем диапазоне высот в пределах ошибок измерений.

Причины расхождений с данными оптических методов носят отчасти методический характер — это занижение размеров частиц из-за их частичного испарения с подложки под лучом электронного микроскопа, потери крупных частиц из-за осаждения на внутренних стенках аспирационной трубки. Кроме того, нуждаются в уточнении величины коэффициентов эффективности инерционного осаждения и аспирации (эта работа в настоящее время проводится).

Опыт разработки и использования аэростатного импактора показал, что созданный прибор может применяться в практике научных исследований для измерения фоновых содержаний стратосферного аэрозоля. Полученные данные дадут начало ряду регулярных наблюдений, которые проводятся в Центральной аэрологической обсерватории. Многократное использование импактора позволит исследовать долгопериодную изменчивость стратосферного аэрозоля. Существующие систематические ошибки измерений могут быть уменьшены в процессе лабораторных калибровок.



Результаты импакторных измерений аэрозоля в г. Рыльске: а, б — распределения частиц по размерам на разных высотах, полученные 3.09.87 г. и 21.06.88 г. соответственно, в — вертикальные профили счетной концентрации частиц с  $r > r_0$ , полученные 21.06.88 г.

1. Marple V.A., Willeke K. // Fine Particles, B.Y.H. Liu, Ed. Academic Press. New York, 1976. P. 411—447.
2. Волощук В. М. Введение в гидродинамику грубодисперсных аэрозолей. Л.: Гидрометеиздат. 1971. 208 с.
3. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 197 с.
4. Атмосферный аэрозоль и его влияние на перенос излучения /Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 119 с.

Центральная аэрологическая обсерватория,  
г. Долгопрудный

Поступила в редакцию  
19 июня 1990 г.

N. D. Tsvetkova, V. A. Yushkov. **Balloonborne Measurements of the Stratospheric Aerosol.**

The design of balloonborne impactor for aerosol particles collection is described. Particle concentration and size distribution data obtained over the altitude range of 10 km to 30 km during summer 1987 and 1988 in Rylysk are presented.