

Б.Д. Белан, Г.О. Задде, М.В. Панченко, Т.М. Рассказчикова, Г.Н. Толмачев

К ВОПРОСУ О ТРАНСФОРМАЦИИ СПЕКТРА РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

По данным самолетных измерений спектров частиц аэрозоля при различных значениях относительной влажности исследованы особенности изменения счетной концентрации. Показано, что процесс ее изменения имеет региональные особенности. Это определяется химическим составом частиц аэрозоля.

Как известно [1], атмосферные аэрозоли играют важную (если не основную) роль в изменении оптических свойств воздуха, определяя тем самым радиационный баланс Земли. Отличаясь исключительным разнообразием свойств, аэрозольные частицы, в свою очередь, испытывают влияние вариаций физических характеристик воздуха. Одним из факторов, определяющих изменение микрофизических и оптических свойств аэрозоля, является изменение влажности воздуха. Принято считать, что в реальной атмосфере увеличение относительной влажности воздуха вызывает увеличение размеров частиц [2]. Обычно эту зависимость записывают с помощью формул Ф. Кастена или Г. Ханела [3, 4]: $a_f = a_c(1 - f_0)^\varepsilon$, где $\varepsilon = 0,18 - 0,255$ в зависимости от типа аэрозолей; a_c — радиус сухой частицы; f_0 — относительная влажность воздуха.

Зависимости [3, 4] нашли многочисленное подтверждение по данным, полученным в приземном слое, то есть вблизи подстилающей поверхности — основного источника аэрозоля, водяного пара и аэрозолеобразующих паров. Как показали наши самолетные эксперименты по искусственному увлажнению аэрозоля, в более чем 90% реализаций зависимость коэффициентов рассеяния от относительной влажности воздуха на всех высотах также хорошо аппроксимируется подобной формулой [5].

К настоящему времени, в результате исследований, выполненных на самолете-лаборатории ИОА СО АН СССР, накоплен большой объем данных измерений распределения частиц аэрозоля по размерам при самых разных значениях относительной влажности. Измерения проводились с помощью комплекса аппаратуры, описанного в [6, 8]. Проверка зависимостей [3, 4] на нашем материале показала, что для пограничного слоя и свободной атмосферы они не всегда выполняются. Поэтому целью настоящей работы является анализ возможных причин, приводящих к нарушению указанных зависимостей.

Для измерения микрофизики аэрозоля использовался модернизированный счетчик АЗ-5, причем один и тот же на протяжении 7 лет. Так как работа счетчика АЗ-5 вызывает много замечаний, целесообразно вначале рассмотреть методические вопросы измерения характеристик аэрозоля фотоэлектрическим способом, реализованным в этом счетчике.

В работах [9–11] рассмотрены возможные ошибки измерения функции распределения частиц аэрозоля по размерам фотоэлектрическими счетчиками в реальной атмосфере при изменении относительной влажности. Основными факторами, влияющими на точность измерений, по данным [9–11], являются отличие оптических постоянных исследуемого аэрозоля, в первую очередь комплексного показателя преломления вещества частиц, от соответствующих характеристик аэрозоля, используемого для калибровки (обычно $m = 1,60 - 0i$), и наличие у счетчиков нижней границы регистрируемых размеров частиц. При измерениях сильные отличия от калибровочных условий могут быть вызваны влиянием влажности воздуха (изменение видимости S_m от 50 до 5 км вызывает уменьшение действительной части показателя преломления от 1,50 до 1,36). Наличие сильного поглощения ($\kappa = 0,1$) может вызвать занижение реальных размеров частиц до 600% [10].

Согласно [10, 11] истинный размер частиц a^* связан с калибровочным $a(1,6)$ соотношением

$$a^*(n) = a(1,6) (0,6/n - 1)^{1,2 - 0,26 \ln p_{1,6}}, \quad (p = 2\pi a/\lambda),$$

a — радиус частицы; λ — эффективная длина волны, равная 0,6 мкм. Конкретно для АЗ-5

$$a^*(0,2; n) = a(0,2; 1,6) 0,6/n - 1, \quad a(0,2; 1,6) = 0,2 \text{ мкм.}$$

А так как радиус частиц зависит от влажности $a(f) = a_0(1 - f)^{-\gamma}$, где a_0 — радиус сухой частицы; f — относительная влажность в сотых долях; γ — параметр конденсационной активности, то при растворении вещества изменяется и показатель преломления вещества частиц $n(f)$

$$\frac{n(f) - n_w}{n_0 - n_w} = (1 - f)^{3\gamma},$$

где n_w — показатель преломления воды.

В соответствии с [9] возможны два варианта реакции счетчика:

1) по мере роста размера частиц с увеличением влажности функция распределения будет смещаться вправо по шкале размеров и АЗ-5 будет регистрировать все большее количество частиц. Следовательно, при постоянном нижнем пределе измерения частиц (a_0) счетчик должен фиксировать увеличение измеряемой концентрации N^* с ростом f (при постоянной полной концентрации частиц);

2) по мере роста влажности уменьшается $n(f)$ и, как следствие, будет смещаться нижний предел регистрации частиц (a_0) в счетчике вправо по шкале размеров, что должно вести к уменьшению N^* при постоянной полной концентрации частиц.

Из физики аэрозоля следует, что процесс увлажнения аэрозоля и растворение его вещества происходит не мгновенно. Поэтому возможны три результата от взаимодействия описанных выше двух механизмов:

1) если скорость смещения a_0 меньше скорости смещения dN^*/da , то счетчик дает увеличение концентрации;

2) при равенстве скоростей изменения a_0 и dN^*/da $N^*(f)$ постоянна;

3) если скорость смещения a_0 больше dN^*/da , то счетчик регистрирует падение N^* .

Расчеты, проведенные в [10, 11], показали, что для всех значений конденсационной активности γ счетчик должен регистрировать монотонное увеличение общей концентрации частиц $N = (r \geq a_0)$ при возрастании влажности.

Для коррекции измерений в [9, 10] предложена формула

$$N = N^* [0,5 \pm \Phi(t)], \quad (a_0 \geq a),$$

где a — фиксируемый размер частиц аэрозоля; $\Phi(t)$ — интеграл вероятности $t = \ln\left(\frac{a_0}{a}\right) / S$, S — параметр, учитывающий полидисперсность аэрозоля и удаленность моды распределения от фиксированного положения нижней границы счетчика a_0 .

Зависимость $N^*(t)$ с высокой точностью ($\pm 2\%$) аппроксимируется параболой в широкой области значений параметра $t = -2,8 \div 0,5$

$$\ln(N^*/N) = at^2 + bt + c,$$

где $a = -0,394$; $b = 0,773$; $c = -0,675$.

Чтобы оценить тенденцию изменения показаний счетчика, при росте влажности весь массив данных измерений распределения частиц аэрозоля по спектру (более 3000 спектров для Западной Сибири и более 1000 спектров для Казахстана) был разбит на четыре группы: I — $f \leq 30$, II — $f = 31 - 59$, III — $f = 60 - 79$ и IV — $f \geq 80\%$. Для каждой из этих групп рассчитаны средние значения независимо от высоты и условий и спектры распределения частиц аэрозоля по размерам, которые представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что для региона Казахстана с ростом влажности (группа кривых 1) проявляется тенденция увеличения концентрации частиц аэрозоля на всем участке рассматриваемого спектра размеров частиц. Следовательно, увлажнение частиц и увеличение их размеров ведет к более быстрому смещению всей функции распределения в целом вправо, а смещение нижнего предела a_0 за счет уменьшения показателя преломления n происходит более медленно.

При изменении влажности концентрация субмикронной фракции увеличивается в 5 и почти в 10 раз — грубодисперсной. Вертикальное распределение счетной концентрации аэрозоля для трех фракций приведено на рис. 2 из которого видно, что увеличение влажности воздуха приводит к росту счетной концентрации почти во всем рассматриваемом диапазоне высот.

Для региона Западной Сибири эта картина несколько сложнее (рис. 1, группа кривых 2). Если грубодисперсная фракция подчиняется такому же закону, т.е. увеличение влажности ведет к росту измеряемой концентрации, то для субмикронной фракции ее поведение зависит от значения относительной влажности, при увеличении которой до $f = 60 - 79\%$ концентрация субмикронной фракции вначале уменьшается, а затем, при влажности $f \geq 80\%$, резко увеличивается. Анализ, проведенный для спектров аэрозольных частиц, измеренных на разных высотах при различных значениях влажности, показывает (рис. 3), что отмеченная особенность выполняется не на всех из них. Если на высоте 600 м присутствует вышеописанная особенность (группа кривых 1), то на высоте 2500 м изменение счетной концентрации при увеличении влажности подчиняется зависимости типа Кастена-Ханела (группа кривых 2); на высоте 4000 м (группа кривых 3) снова видно нарушение тенденции к увеличению концентрации от влажности для субмикронной фракции.

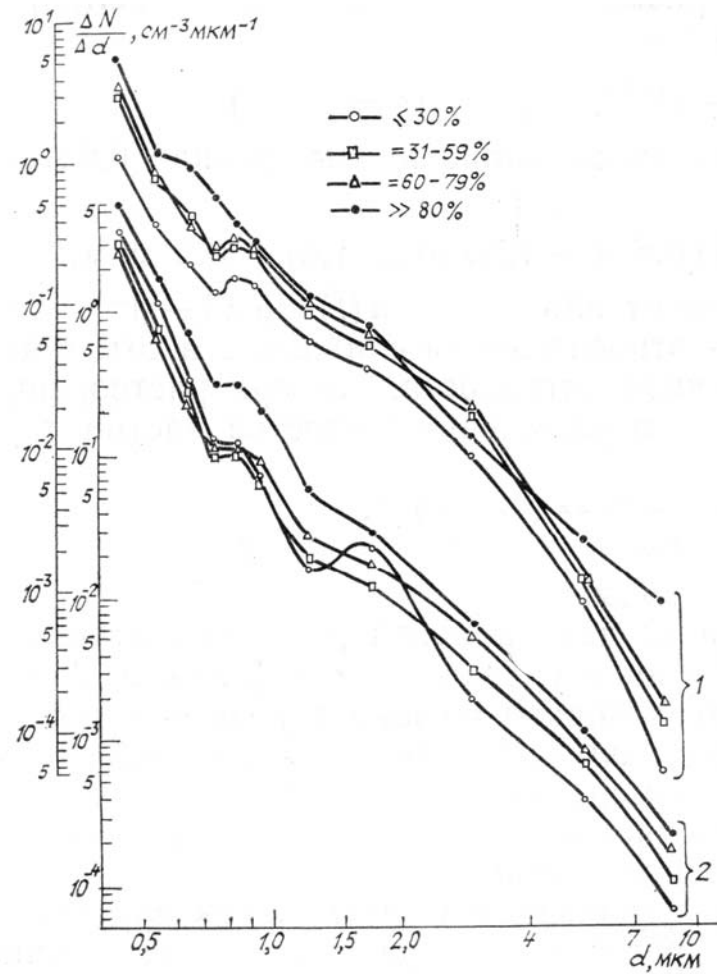


Рис. 1. Распределение частиц аэрозоля по спектру над Казахстаном (1) и Западной Сибирью (2) при различной влажности

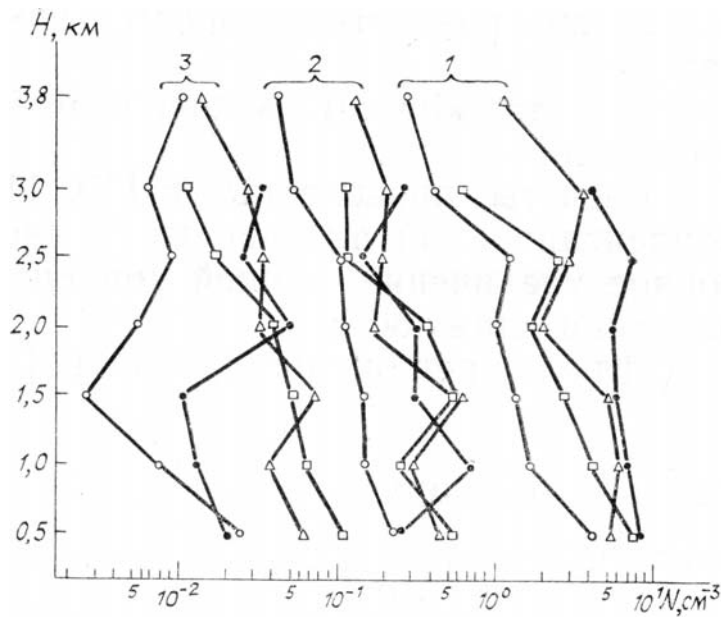


Рис. 2. Вертикальное распределение аэрозоля над Казахстаном для фракций: 1 - $d = 0,4 \div 0,5$ мкм; 2 - $d = 0,8 \div 0,9$ мкм; 3 - $d = 4 \div 7$ мкм, при различной влажности (обозначения см. на рис. 1)

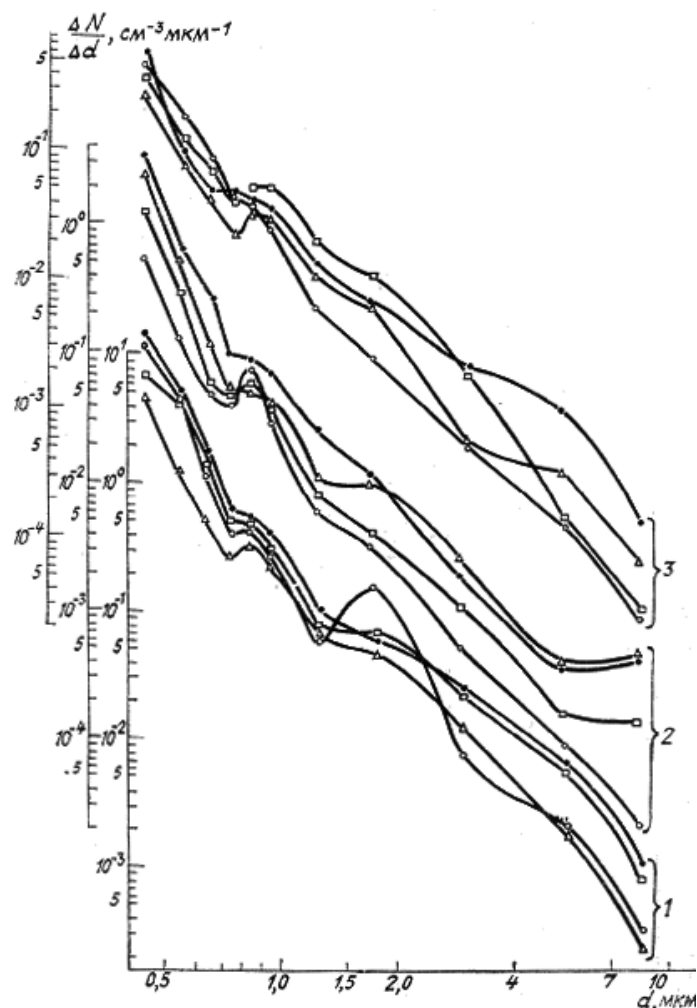


Рис. 3. Распределение частиц аэрозоля по спектру над Западной Сибирью при различной влажности (обозначения см. на рис. 1) на высотах: 1—600; 2—2500; 3—4000 м

Такие различия в результатах измерения счетной концентрации аэрозоля при различных значениях относительной влажности над двумя регионами, по нашему мнению, могут объясняться различием в химическом составе аэрозоля, на что также указывалось в [11]. В качестве подтверждения этой мысли приведем данные о химическом составе аэрозоля над обоими регионами (таблица).

Химический состав аэрозоля над Западной Сибирью и Казахстаном (мкг/м):
числитель — среднее значение, знаменатель — число проб

Регион	Элемент										
	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Al	Ca	Si	Fe	Mg	Na ⁺	K ⁺
Западная Сибирь	0,44/234	0,22/233	5,95/234	3,01/235	2,04/286	0,42/146	3,57/221	1,30/225	0,18/224	0,34/236	0,09/235
Казахстан	0,28/203	0,32/204	3,01/203	1,15/201	3,29/138	0,67/69	17,64/126	2,81/135	0,73/86	0,92/205	0,02/203

Из данных таблицы следует, что над Западной Сибирью в составе аэрозоля преобладают ионы и элементы, характерные для частиц фотохимического происхождения, которые обычно имеют размеры меньше 1 мкм, т.е. попадают в субмикронную фракцию. Это ионы SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, K⁺. Над Казахстаном, наоборот, в составе аэрозоля присутствуют элементы, которые характерны для грубодисперсных частиц почвенного происхождения Al, Ca, Si, Fe, Mg. А так как химический состав аэрозоля определяет микроструктуру частиц и, соответственно, механизм увлажнения и разбавления вещества, то это и отражается на динамике счетной концентрации субмикронной фракции.

На наш взгляд, динамику увлажнения аэрозоля над Западной Сибирью можно объяснить следующим образом. На начальной стадии увлажнения частиц аэрозоля происходит разбавление их вещества, что приводит к уменьшению показателя преломления n и, соответственно, к смещению a_0 .

Когда относительная влажность превышает 80%, то начинает преобладать конденсационный рост частиц, происходит резкое увеличение скорости dN^*/da , и, соответственно, повышается измеряемая величина концентрации аэрозоля N^* .

В заключение авторы выражают глубокую признательность Ю.А. Пхалагову за ряд ценных критических замечаний.

1. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 254 с.
2. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Аэрозольные модели атмосферы. М.: Наука, 1981. 103 с.
3. Kasten F. //Tellus. 1968. V. 21. № 5. P. 631.
4. Hanel J. //Atmos. Environ. 1982. V. 16. № 11. P. 2703.
5. Белан Б.Д., Задде Г.О., Панченко М.В. и др. //Оптические свойства земной атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР. Томск, 1988. С. 45–51.
6. Белан Б.Д. //Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы, Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 34.
7. Панченко М.В., Тумаков А.Г., Терпугова С.А. //Там же. С. 40.
8. Ковалевский В.К., Толмачев Г.Н. //Там же. С. 53.
9. Козлов В.С., Панченко М.В., Польшкин В.В., Пхалагов Ю.А. // Материалы VIII Всес. симпозиума по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1986. Ч. 1. С. 32.
10. Козлов В.С., Фадеев В.Я. //Там же. Ч. 3. С. 314.
11. Козлов В.С., Панченко М.В., Польшкин В.В., Пхалагов Ю.А. // Изв. АН СССР. ФАО. 1987. Т. 23. С. 286.
12. Лактионов А.Г. //Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т. 21. № 6. С. 614.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
22 ноября 1988 г.

B. D. Belan, G. O. Zадde, M. V. Panchenko, T. M. Rasskazchikova,
G. N. Tolmachev. **On the Transformations of Aerosol Particles Size-Spectrum due to Humidity Changes.**

Some peculiarities in the behavior of aerosol particles number density at different values of relative air humidity are investigated based on the data of airborne measurements of aerosol size spectra. It is shown that there exist certain regional peculiarities in this behavior dependent on the chemical composition of particulate matter.