

УДК 551.510 (575.27)

**ИЗМЕРЕНИЯ ПРИЗЕМНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ АЭРОЗОЛЕЙ
ИССЫК-КУЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ, ИХ МИКРОСТРУКТУРА
И НЕКОТОРЫЕ МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

Т.Д. Саргазаков, Ш. Жусупкельдиев

Получены микрофизические параметры бимодальных логнормальных распределения по размерам приземных аэрозолей по результатам измерений на оз. Иссык-Куль 4-канальным прибором 831 Aerosol Mass Monitor в период со 2 по 7 июня 2017 г. Концентрации не превышают предельно допустимых норм.

Ключевые слова: аэрозоли; бимодальное логнормальное распределение; микрофизические параметры.

**MEASUREMENTS OF SURFACE AEROSOL CONCENTRATIONS OF ISSYK-KUL BASIN,
THEIR MICROSTRUCTURE AND SOME MICROPHYSICAL CHARACTERISTICS**

T.D. Sargazakov, Sh. Jusupkeldiev

The micro-physical parameters of bimodal lognormal distribution of the surface aerosols were obtained based on the measurements from Issyk-Kul using a 4 channeled device 831 Aerosol Mass Monitor in the period from June 2 to June 7, 2017. The concentrations do not exceed the maximum permissible standards.

Keywords: aerosols; bimodal lognormal distribution; microphysical parameters.

Введение. Аэрозоли – это твердые, жидкие, или состоящие из смеси различных фаз частицы, взвешенные в воздухе. Они важны, поскольку влияют на наше здоровье, на качество воздуха, которым мы дышим (особенно это относится к наиболее проникающим в легкие аэрозолям субмикронных размеров с радиусом $r < 1$ мкм), они влияют на образование облаков, на метеорологические процессы и климат. Аэрозоли попадают в атмосферу двумя путями: через эмиссию с поверхности земли или из космоса; через гомогенную нуклеацию из газов атмосферы (в основном из паров воды и серной кислоты) [1].

Выделяют три фракции размеров частиц: мелкодисперсную, с радиусами $r = 0,05-0,1$ мкм; субмикронную, с радиусами $r = 0,1-1,0$ мкм; и крупнодисперсную, с $r > 1,0$ мкм [2]. Первые две фракции определяются такими процессами, как: гомогенная нуклеация, конденсация, коагуляция (соударение и слияние частиц), растворением и химическими реакциями газов атмосферы на поверхности и внутри аэрозолей, а также эмиссией малых частиц от различных источников (пыль, автомобили, сжигание углеводородных соединений и т. д.). Они часто образуют одну единую фракцию (одну

моду). Крупнодисперсная фракция (вторая мода), обусловлена также конденсацией, коагуляцией частиц и эмиссионными процессами. Сухое осаждение, вымывание, а во второй моде еще и седиментация, являются важными стоками аэрозолей из атмосферы.

В связи с этим, а также из-за нечувствительности измерительных приборов к мелкодисперсной фракции, в данной работе рассматриваются субмикронные и крупнодисперсные аэрозоли (две моды). В качестве аппроксимации распределения микрофизических свойств частиц (масса, объем, площадь и счетная концентрация) от их радиуса, взята бимодальная с двумя модами логарифмически нормальных распределений [2, 3]. На основе пятиканальных измерений, построены параметры распределений аэрозолей для различных населенных мест: г. Балыкчи, г. Чолпон-Ата, п. Бозтери, г. Каракол, п. Каджи-Сай. При этом, во всех пунктах, измерения проводились у озера, на трассе и в поле, с выделением трех типов аэрозолей – морского, антропогенного (углеродного) и пылевого. Полученные распределения могут быть использованы как граничные и начальные условия для аэрозольных моделей тропосферы.

Таблица 1 – Перечень пунктов измерений

№ п/п	Пункт наблюдения	Примечания
1	Балыкчи, трасса	Ветер, переменная облачность, 2 и 7 июня 2017 г.
2	Балыкчи, у озера	Ветер, облачно, 2 июня 2017 г., берег, 15 ч 40 м
3	Балыкчи, поле	Ветер, малооблачно, 2 и 7 июня 2017 г.
4	Бозтери, трасса	Малооблачно, 2 и 3 июня 2017 г., ремонтные работы дороги
5	Бозтери, у озера	Малооблачно, 2 и 3 июня 2017 г., пирс, 70 м от берега
6	Бозтери, поле	Малооблачно, 2 и 3 июня 2017 г., более 70 м над уровнем моря
7	Каракол, трасса, центр	Малооблачно, 4 и 5 июня 2017 г., окраина и центр
8	Жети-Огуз	После дождя, 5 июня 2017 г., 12 ч 20 м
9	Барскоон	Ливень, 5 июня 2017 г., 14 ч 00 м
10	Каджи-Сай, центр	После дождя, 5 июня 2017 г., 15 ч 40 м
11	Каджи-Сай, трасса	После дождя, 5 и 6 июня 2017 г., ясная погода
12	Каджи-Сай, у озера	После дождя, 5 и 6 июня 2017 г., ясная погода, п-т Алтын-Жеек, пирс
13	Каджи-Сай, поле	После дождя, 5 и 6 июня 2017 г., ясная погода, более 50 м над уровнем моря

Таблица 2 – Массовые концентрации аэрозолей (мкг/м³) соответствующих размеров в пунктах измерений, согласно таблице 1

№ =	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
PM10	39.5	17.7	26.5	146.5	30.83	28.2	101.1	9.2	15.2	7.3	22.8	5.68	7.7
PM4	18.6	13.45	14.2	46.91	14.84	13.3	41.13	8.45	8.3	5.45	8.47	4.65	5.4
PM2.5	10.2	6.75	7.58	25.59	7.013	6.83	21.14	6.3	4.85	3.9	3.2	2.67	3.3
PM1	3.73	1.55	1.55	5.025	2.263	2.58	7.075	3.95	2.25	1.85	1.47	1.38	1.5
TSP	50.3	17.7	31.9	236.7	35.29	34.6	129.9	10.2	18.7	9.1	29.4	5.98	7.9

Результаты измерений. Все измерения проводили в период со 2 по 7 июня 2017 г. с помощью прибора 831 Aerosol Mass Monitor, который показывает массовые концентрации аэрозолей (в мкг на м³ воздуха) с диаметрами $D < 1$ мкм (PM1, до ~ 0,5 мкм – чувствительность прибора), $D < 2,5$ мкм (PM2.5), $D < 4$ мкм (PM4), $D < 10$ мкм (PM10) и полную массу всех аэрозолей (TSP). Таким образом, в каждом измерении мы имели массовую концентрацию аэрозолей (мкг/м³) в пяти диапазонах: 0,5–1; 1–2,5; 2,5–4; 4–10 и более 10 мкм в диаметре. Измерения проводили у поверхности земли и на высоте 2,2 м, после чего брали средние значения между ними. Пробные измерения на высотах 4,5 и 6,5 м показали, что они мало отличаются от измерений на более низкой высоте. Эксперименты проводили во всех пунктах: утром, в обед и вечером, и они показали слабые изменения концентраций в течение дня, за исключением измерений у озера, когда утром и вечером массовые концентрации аэрозолей были повышены. Возможно, это объясняется понижением температуры и повышением влажности воздуха в это время, что приводит к увеличению массы аэрозолей за счет их увлажнения.

Все замеры сведены в таблицу 1. В таблице 2 приведены результаты измерений во всех пунктах, согласно таблице 1. Они представляют собой усредненные среднедневные значения, если в примечании таблицы 1 не указано конкретное время.

Метод построения бимодальных логнормальных распределений. Распределения частиц по размерам крупнодисперсной фракции определяется в основном коагуляцией и седиментацией, благодаря чему, наиболее точно это распределение описывается логарифмически нормальным распределением [2–4]:

$$dx(r) = \frac{Xdr}{r\sqrt{2\pi} \ln \sigma} \exp\left[-\frac{(\ln r / \bar{r}_x)^2}{2 \ln^2 \sigma}\right], \quad (1)$$

где x – обозначение распределений по массе m , объему v , площади a , и концентрации n (соответственно в мкг/м³, мкм³/см³, мкм²/см³, частиц/см³) частиц в единице объема воздуха и интервале dr радиуса частиц; X – обозначение полных: массы M (мкг/м³), объема V (мкм³/см³), площади A (мкм²/см³), и концентрации N (частиц/см³); \bar{r}_x – модальные или геометрически средние радиусы соответствующих распределений; σ – геометрически-стандартное отклонение, для всех распределений одинаковое [5]. Поскольку мы имеем массовые концентрации частиц в пяти диапазонах: 0,5–1; 1–2,5; 2,5–4; 4–10 и более 10 мкм в диаметре, то для расчетов средне-геометрических диаметров распределений и стандартного отклонения σ , первый диапазон не рассматривался (здесь накладываются субмикронные и крупнодисперсные фракции), и в каждом следующем диапазоне все частицы имеют одинаковый средний диаметр, а именно: $D_1 = 1,75$, $D_2 = 3,25$, $D_3 = 7$, а для частиц более 10 мкм в диаметре было выбрано $D_4 = 11,5$ мкм.

Модальный массовый диаметр и стандартное отклонение вычисляются по следующим формулам:

$$\ln \bar{D}_m = (\sum_{j=1}^4 m_{j+1} \ln D_j) / M_L, \quad (2)$$

$$\ln \sigma = \sqrt{(\sum_{j=1}^4 m_{j+1} \ln^2 \frac{D_j}{\bar{D}_m}) / M_L},$$

где m_j – масса аэрозолей в соответствующем диапазоне; M_L – масса всех аэрозолей, исключая первый диапазон и $\bar{D}_m = 2\bar{r}_m$. Полагая, что плотность вещества аэрозолей ρ_a в пределах одной фракции одинакова, получаем: $\bar{r}_v = \bar{r}_m$. Для распределения счетной концентрации аэрозолей, находим:

$$\ln \bar{D}_n = (\sum_{j=1}^4 n_{j+1} \ln D_j) / N_L, \quad (3)$$

$$N_L = \sum_{j=1}^4 n_{j+1}, \quad n_{j+1} = \frac{6m_{j+1}}{\pi \rho_a D_j^3}.$$

Из (1) интегрированием можно получить [6], [7], так что полная масса и полная поверхность аэрозолей крупнодисперсной фракции будут равны:

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_a N \bar{r}_n^3 \exp\left[\frac{9 \ln^2 \sigma}{2}\right], \quad (4)$$

$$A = 4\pi N \bar{r}_n^2 \exp\left[2 \ln^2 \sigma\right], \quad (5)$$

где N – полная счетная концентрация аэрозолей (частиц/см³); $\bar{r}_n = \bar{D}_n / 2$. Так как $N = N_L + n_1$, где n_1 – счетная концентрация аэрозолей диаметром меньше 1 мкм (1^й диапазон), то используя (4), можно получить уравнение:

$$M_L + \frac{4}{3} \pi \rho_a r_y^3 n_1 = \frac{4}{3} \pi \rho_a (N_L + n_1) \bar{r}_n^3 \exp\left[\frac{9 \ln^2 \sigma}{2}\right], \quad (6)$$

где r_y – средний радиус частиц в первом диапазоне, который принят для расчетов равным 0,4 мкм. Из уравнения (6) мы легко находим n_1 , затем $N = N_L + n_1$, M – из (4), и A – из (5).

Для расчетов удобно, как это используется во всех аэрозольных моделях [8], разбить непрерывное изменение радиусов аэрозолей r на дискретное (на бины), основываясь на геометрически увеличивающемся частичном объеме. Если r_i и v_i – это радиус и объем, соответственно частиц, сосредоточенных в i -ом бине, то устанавливая $v_{i+1}/v_i = VRAT = \text{const}$, с учетом сферичности частиц, имеем:

$$r_{i+1} = VRAT^{1/3} r_i, \quad r_{iup} = r_i \frac{(2VRAT)^{1/3}}{(VRAT+1)^{1/3}},$$

$$\Delta v_i = 2 \frac{VRAT-1}{VRAT+1} v_i \quad (7)$$

$$\Delta r_i = \left(\frac{2}{VRAT+1}\right)^{1/3} (VRAT^{1/3}-1) r_i,$$

где r_{iup} – верхняя граница радиуса бина i ; Δv_i и Δr_i – ширина бина i в объеме и в радиусе, соответственно. В данной работе принято $VRAT = 2$, $r_1 = 0,01$ мкм и рассматривается 40 бинов ($r_{40} \approx 82$ мкм), при этом $\Delta r_i \approx 0,23 r_i$.

Теперь, используя такое разбиение, мы можем в каждом бине i рассчитать концентрации n_i и массы m_i аэрозолей, используя значения N и M и формулу (1), и далее найти объем V_i и площадь a_i аэрозолей в бине i , соответственно по формулам $V_i = m_i/\rho_a$, $a_i = 3V_i/r_i$. Далее модальный поверхностный радиус получаем из формулы:

$$\bar{r}_s = \frac{\sum_{i=1}^{40} a_i \ln r_i}{A}. \quad (8)$$

Таким образом находятся все микрофизические параметры логнормальных распределений крупнодисперсной фракции аэрозолей. Поскольку чувствительность измерительного прибора составляет 0,5 мкм в диаметре, то для восстановления аппроксимационного логнормального распределения по массе субмикронной и мелкодисперсной фракций аэрозолей, входящих в нечувствительную зону, нам необходимо знать массу всей этой моды (назовем ее нулевой) M_0 , модальный радиус r_{m0} и стандартное отклонение σ_0 . Высота равномерного распределения сульфатных аэрозолей (основной компонент фракции мелких частиц) для средних широт составляет 1,5 км [9], а в работе [4] на основе многочисленных лидарных измерений аэрозолей на станции “Теплоключенка” (оз. Иссык-Куль) для высот пограничного слоя 1–1,5 км установлено, что значения $r_{m0} = 0,08$ – $0,11$ мкм и $\sigma_0 = 1,4$ – $1,7$. Поэтому, в данной работе для всех измерений приземных концентраций аэрозолей было принято $r_{m0} = 0,1$ мкм и $\sigma_0 = 1,55$.

Измеренная масса аэрозолей первого диапазона (PM1) включает частицы с радиусами от 0,25 до 0,5 мкм. Это соответствует бинам с номерами $i = 15, 16, 17, 18$. Если из измеренной массы PM1 вычесть известные массы аэрозолей крупнодисперсной фракции, сосредоточенных в этих бинах, то мы получим массу аэрозолей мелкой фракции в этих же бинах. Просуммировав массы по этим бинам мелкой фракции, с использованием формул (1) и (7) получим уравнение, из которого найдем M_0 – массу всех мелких частиц. Найдя по формулам (1) и (7) с известными значениями M_0 , r_{m0} и σ_0 , массу m_{i0} аэрозолей во всех бинах, мы найдем соответствующие значения объемов, концентраций и поверхностей в бинах по формулам:

$$V_{i0} = \frac{m_{i0}}{\rho_{a0}}, \quad n_{i0} = \frac{V_{i0}}{v_i}, \quad a_{i0} = \frac{3V_{i0}}{r_i}. \quad (9)$$

Таблица 3 – Микрофизические параметры первой моды для измерений, приведенных в таблице 1

№	$M_0, \mu\text{g}/\text{m}^3$	$V_0, \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$	$S_0, \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$	$r_{s0}, \mu\text{m}$	N_0, cm^{-3}	$r_{n0}, \mu\text{m}$
1	3.988	2.215	71.896	0.083	1233.523	0.056
2	1.153	0.641	20.790	0.083	356.687	0.056
3	0.345	0.192	6.216	0.083	106.652	0.056
4	15.726	8.737	283.540	0.083	4864.696	0.056
5	2.867	1.593	51.687	0.083	886.790	0.056
6	4.318	2.399	77.852	0.083	1335.711	0.056
7	12.126	6.737	218.631	0.083	3751.043	0.056
8	5.407	2.703	87.732	0.083	1505.216	0.056
9	4.210	2.105	68.308	0.083	1171.954	0.056
10	3.333	1.852	60.100	0.083	1031.141	0.056
11	3.227	1.793	58.191	0.083	998.386	0.056
12	2.394	1.330	43.156	0.083	740.425	0.056
13	2.519	1.399	45.415	0.083	779.177	0.056

Таблица 4 – Микрофизические параметры второй моды для измерений, указанных в таблице 1

№ п/п	$M, \mu\text{g}/\text{m}^3$	$r_m = r_v, \mu\text{m}$	$V, \mu\text{m}^3/\text{cm}^3$	$S, \mu\text{m}^2/\text{cm}^3$	$r_s, \mu\text{m}$	N, cm^{-3}	$r_n, \mu\text{m}$	σ
1	45.27	2.82	20.03	22.33	2.10	0.78	1.03	1.86
2	15.97	1.42	7.98	17.67	1.26	1.09	1.01	1.41
3	28.14	2.79	14.07	11.14	2.33	0.31	0.98	2.09
4	234.01	3.50	103.54	132.09	2.06	4.97	1.05	1.76
5	32.04	2.56	16.02	19.07	1.97	0.68	1.05	1.81
6	31.21	2.76	15.61	17.91	2.07	0.63	1.05	1.83
7	121.30	2.96	53.67	64.28	2.08	2.30	1.06	1.80
8	5.31	1.71	3.54	3.54	1.19	0.12	0.95	1.97
9	15.72	2.65	13.10	14.02	2.07	0.48	1.02	1.89
10	6.47	2.27	3.60	2.91	1.79	0.09	0.95	2.09
11	28.09	3.12	13.38	16.93	2.09	0.55	1.19	1.69
12	4.19	1.76	2.10	2.71	1.42	0.11	1.00	1.79
13	5.79	1.86	3.22	4.12	1.50	0.17	0.99	1.80

По этим формулам, проведя соответствующие суммирования, как описывалось выше, найдем полные: объем V_0 ($\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$), концентрацию N_0 (частиц/ cm^3), поверхность S_0 ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) и соответствующие модальные радиусы $r_{v0} = r_{m0}$, r_{n0} и r_{s0} фракции мелких частиц, где ρ_{a0} – их плотность.

Результаты вычислений микрофизических параметров. Субмикронная фракция аэрозолей формируется в результате таких процессов, как гомогенная нуклеация, конденсация паров воды, кислот H_2SO_4 , HNO_3 и других газов, химических реакций на поверхности и внутри частиц, растворения газов (CO_2 , HCl , NH_3 и др.), коагуляции жидких и твердых (элементарный и органический углерод) частиц [5]. Седиментационное осаждение довольно незначительно, и основными стоками этих аэрозолей являются сухое осаждение (с характерным временем поглощения $\tau_{\text{погл}} \sim 200$ ч) и вымывание ($\tau_{\text{вым}} \sim 100$ ч) [9]. Поэтому можно принять однородность этой фракции, как по времени, так и по всей Иссык-Кульской котловине. Содержание кислот в таких водных аэрозолях сильно зависит от влажности и температуры воздуха [10], поэтому плот-

ность вещества аэрозолей принята в среднем $\rho_{a0} = 1,8$ г/ cm^3 [4], с учетом твердых включений в них.

Для карбоновых аэрозолей крупной фракции на трассе плотность частиц составила $\rho_a = 2,26$ г/ cm^3 , для пылевого в поле и для морского у озера плотность была принята равной $\rho_a = 2,0$ г/ cm^3 [4]. В условиях повышенной влажности (измерения 8, 9, 10, таблица 1) для мелкой фракции плотность была принята равной 1,9 г/ cm^3 , а для крупной фракции – 1,5 г/ cm^3 .

В таблице 3 приведены микрофизические параметры логнормальных распределений (1) субмикронных фракций (первые моды), вычисленных для измерений, приведенных в таблице 1, по описанному выше методу. Здесь M_0 , V_0 , S_0 , N_0 – полная масса ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), полный объем ($\mu\text{m}^3/\text{cm}^3$), полная поверхность ($\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$) и полная концентрация (частиц/ cm^3) всех аэрозолей данной фракции, r_{n0} и r_{s0} (в μm) – модальные радиусы поверхностных и числовых распределений, соответственно. Для всех распределений принято $\sigma_0 = 1,55$ и $r_{m0} = r_{v0} = 0,1$ μm .

В таблице 4 приведены те же микрофизические параметры, только для вторых крупнодисперсных

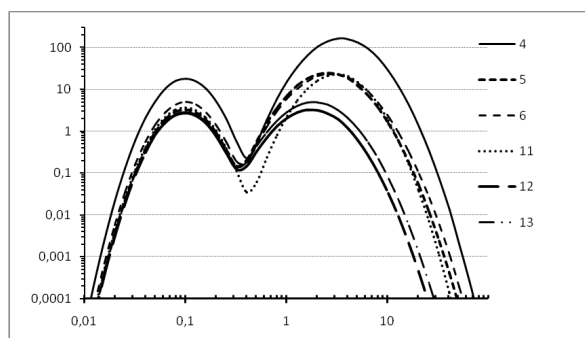


Рисунок 1 – Бимодальные распределения объемных концентраций аэрозолей для пунктов измерений 4, 5, 6 и 11, 12, 13 (таблица 1). По вертикальной оси откладывается функция $dV/d\log_{10}r$ ($\text{мкм}^3/\text{см}^3$ по формуле (10)), по горизонтальной оси – радиус частиц r (мкм)

мод, вычисленных по приведенным выше формулам, согласно таблице 1.

По результатам лазерного зондирования на оз. Иссык-Куль [4] в июне 2003 г., среднемесячные значения площади поверхности и массовой концентрации аэрозольных частиц в пограничном слое (1–3 км) второй моды, соответственно составили: $35,0 \pm 19,4 \text{ мкм}^2/\text{см}^3$ и $24,2 \pm 15,8 \text{ мкг}/\text{м}^3$, а средний радиус частиц по счетной концентрации – $0,58 \pm 1,04 \text{ мкм}$. Сравнение с соответствующими результатами приземных концентраций, приведенных в таблице 4, показывает хорошее соответствие, что согласуется с тем фактом, что высота постоянства концентраций частиц в атмосфере составляет 1,5 км [9]. Данные таблиц 3 и 4 показывают, что доля мелкой фракции частиц в общем балансе составляет около 10 % и менее, как и было отмечено в работе [4].

Аппроксимация логнормальными распределениями объемных концентраций аэрозолей для пунктов с. Бозтери и с. Каджи-Сай (измерения 4, 5, 6 и 11, 12, 13, таблица 1) показаны на рисунке 1. Поскольку радиусы частиц на графике откладывались в логарифмическом масштабе, то функции распределения вычислялись как

$$\frac{dV}{d\log_{10} r} \approx \frac{V_i}{\log_{10} r_{iup} / r_{i-lup}} = \frac{3V_i}{\log_{10} VRAT}, \quad (10)$$

где V_i – объем аэрозолей в бине i ($\text{мкм}^3/\text{см}^3$).

Сравнение распределений, показанных на рисунке 1, с соответствующими распределениями частиц фонового аэрозоля в пограничном слое на оз. Иссык-Куль [4], отражает похожую бимодальную микроструктуру и близкие значения функций распределения на пиках соответствующих мод.

В заключение хотелось бы отметить, что проведенные авторами измерения на оз. Иссык-Куль

со 2 по 7 июня 2017 г. – до открытия туристического сезона, показали во всех пунктах низкие концентрации частиц, не превышающие допустимых норм [11].

Данная работа поддержана Департаментом науки при МОиН КР. Договор № 68 на выполнение научно-исследовательской работы, 2017. Тема проекта: “Измерение и анализ приземных концентраций вредных примесей в атмосфере Иссык-Кульской котловины”.

Литература

1. Vehkamäki H. An improved parameterization for sulfuric acid – water nucleation rates for tropospheric and stratospheric conditions / H. Vehkamäki, M. Kulmala, I. Napari, et al. // J. Geophys. Res. V.107, N.D22, 2002. P. 4622.
2. Довгалюк Ю.А. Физика водных и других атмосферных аэрозолей: учебн. пособие / Ю.А. Довгалюк, Л.С. Ивлев. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1977. 256 с.
3. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию / П. Райст; пер. с англ. М.: Мир, 1987. 280 с.
4. Чен Б.Б. Оптические свойства аэрозолей Центрального Тянь-Шаня по данным лазерного зондирования / Б.Б. Чен, Л.Г. Свездлик. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2006. 274 с.
5. Jacobson M.Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling / M.Z. Jacobson. Cambridge University Press: Second edition. New York, 2005. 813 p.
6. Hofmann D.J. Balloon – born measurements of aerosol, condensation nuclei, and cloud particles in stratosphere at McMurdo station, Antarctica, during the spring of 1987 / D.J. Hofmann, J.M. Rozen, J.W. et al. // J. Geophys. Res. V.94. D9. 1989. P. 11253–11269.
7. Прудников А.П. Интегралы и ряды: в 3 т. Т. 1. Элементарные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. М.: Физматлит, 2003. 632 с.
8. Toon O.B. A multidimensional model for aerosols: description of computational analogs / O.B. Toon, R.P. Turco, D. Westphal, et al. // J. Atmos. Sci. 1988. V. 45. No.15. P. 2123–2143.
9. Израэль Ю.А. Кислотные дожди / Ю.А. Израэль, И.М. Назаров, А.Я. Прессман и др. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 270 с.
10. Саргазаков Т.Д. Анализ бинарной $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ жидкой системы применительно к стратосферным аэрозолям / Т.Д. Саргазаков // Вестник КРСУ. 2014. Том 14. № 2. С.148–154.
11. Национальный доклад о состоянии окружающей среды в КР за 1998–1999 гг. Бишкек, 2000. 160 с.