

А.В. Васильев, Л.С. Ивлев

Оптическая статистическая аэрозольная модель атмосферы для района Ладожского озера

Научно-исследовательский институт физики (НИИФ)
Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 29.06.99 г.

Построена микрофизическая аэрозольная модель для района Ладожского озера с использованием литературных данных и результатов самолетных измерений счетной концентрации и химического состава аэрозольных частиц.

Введение

В задачах численного моделирования радиационного режима оз. Ладожское, мониторинг состояния которого имеет важное значение для г. Санкт-Петербурга и всего Северо-Запада России [1, 2], а также в обратных задачах определения атмосферно-оптических и гидрооптических параметров озера [1, 3] существенное место занимает аэрозольная модель атмосферы. Причем для указанных задач важны не только средние оптические параметры атмосферы, но и их вариации и ковариации.

Применительно к оптике аэрозоля для получения указанных статистических характеристик требуется репрезентативный массив результатов экспериментальных измерений оптических характеристик. Такие измерения над Ладожским озером проводились [1, 4], но использование их для построения аэрозольной оптической модели проблематично: измерялись не сами аэрозольные характеристики, а спектральные потоки и притоки; измерения выполнены в узком спектральном диапазоне; статистика измерений недостаточно репрезентативна и т.п. Поэтому единственно возможным представляется применение традиционного численного моделирования оптических свойств атмосферных аэрозолей. Задаются модели микрофизических аэрозольных параметров: комплексный показатель преломления вещества (КПП), функции распределения частиц по размерам, вертикальные профили концентрации, а оптические характеристики вычисляются по ним; причем в отличие от обработки измерений здесь могут быть получены любые необходимые оптические характеристики в любых спектральных диапазонах.

Так как задачей моделирования является получение статистических оптических характеристик аэрозоля, то они получались на основе вариаций микрофизических характеристик. Построение моделей подобных вариаций с учетом сильной естественной изменчивости аэрозоля в принципе несложно: при обработке данных экспериментальных измерений помимо средних параметров достаточно определять, например, их среднеквадратическое отклонение (СКО); при привлечении литературных данных вариации можно оценить, сравнивая модели разных авторов. При построении микрофизической аэрозольной модели для района Ладожского озера нами использовались как литературные ис-

точники, так и результаты непосредственных самолетных измерений счетной концентрации и химического состава аэрозольных частиц, выполнявшихся в лаборатории физики аэрозолей отдела физики атмосферы НИИФ.

Принципы моделирования

Аэрозоль рассматривается как случайная система. С учетом неполноты наших знаний об аэрозоле выбрана простейшая модель статистических вариаций: для дискретных величин задаются априорные вероятности их появления; для непрерывных величин предполагается равномерное распределение на определенном интервале либо нормальное распределение, которое характеризуется средним значением и дисперсией (для векторов – средним и ковариационной матрицей).

Каждая конкретная реализация микрофизической модели получается путем ее моделирования (розыгрыша) на основе генерации случайных чисел, равномерно либо нормально распределенных. Введем следующие обозначения: $Rd(a, b)$ – равномерно распределенная скалярная случайная величина на интервале $[a, b]$; $Nd(a, s)$ – нормально распределенная скалярная случайная величина со средним a и СКО s ; $ND(a_i, s_{ij})$ – нормально распределенная векторная случайная величина со средним a_i ($i = 1, \dots, N$, N – размерность вектора) и ковариационной матрицей s_{ij} ($j = 1, \dots, N$).

Использование нормального распределения удобно в техническом плане при моделировании случайных величин [5]. Однако для многих параметров имеет смысл, во-первых, задавать относительные вариации, во-вторых, задавать их достаточно большими (например, 100%). Но для величин, имеющих ограничения по физическому смыслу, в частности положительных, задание больших вариаций не соответствует нормальному распределению вследствие его неограниченности. Например, для относительной вариации 100% примерно в 16% случаев будем получать отрицательные значения. Любой вариант «борьбы» с ними, например простое «отбрасывание», исказит функцию распределения, сделав ее несимметричной, а следовательно, отличной от нормальной, одновременно исказив реальные математическое ожидание и дисперсию случайной величины.

Учитывая, что задание относительной вариации фактически эквивалентно заданию вариации порядка ве-

личины, перейдем для больших вариаций ограниченных величин к логнормальному распределению, т. е. будем моделировать нормальное распределение случайной величины. При этом потребуем равенства математического ожидания и дисперсии у исходного нормального и логнормального распределений. Исходя из этого условия, получаем алгоритм моделирования

$$Ld(a, d) = \exp \left\{ Nd \left[\ln a / \sqrt{1 + d^2}, \sqrt{\ln(1 + d^2)} \right] \right\},$$

где $Ld(m, d)$ – логнормальное распределение, аппроксимирующее нормальное распределение с математическим ожиданием a и относительным СКО d ($d = s/a$, s – СКО нормального распределения).

Принимая во внимание условности модели, примем аналогичную аппроксимацию и для многомерного распределения

$$LD(a_i, d_i, c_{ij}) = \exp \left\{ ND \left[a_i / \sqrt{1 + d_i^2}, \sqrt{\ln(1 + d_i^2)} \ln(1 + d_i^2) c_{ij} \right] \right\},$$

где $Ld(a_i, d_i, c_{ij})$ – логнормальное векторное распределение, аппроксимирующее нормальное векторное распределение с математическим ожиданием a_i , относительно СКО d_i и корреляционной матрицей c_{ij} . Оптические характеристики вычисляются по каждой случайной реализации статистической микрофизической модели по алгоритмам [6–8]. При моделировании используется традиционный блочный подход. Атмосфера разбивается на два блока по высоте: тропосфера и стратосфера.

Тропосферный аэрозоль для конкретной модели представляется как сумма независимых компонентов аэрозолей различного происхождения. По литературным данным [9, 10–13] и результатам прямых измерений микрофизических параметров аэрозоля, выполненных в районах зондирования, выделим следующие блоки аэрозольной модели тропосферы. Для Ладожского озера зимой – два блока: ледяные частицы, городской аэрозоль. Для Ладожского озера летом – четыре блока: водные частицы, городской, почвенный и морской аэрозоли.

Влияние стратосферного аэрозоля на рассматриваемый объект незначительно по сравнению с влиянием тропосферного аэрозоля. Поэтому не будем строить для стратосферного аэрозоля развитую модель, а ограничимся, по данным [14], двумя блоками: сернокислотные частицы и пыль (без разделения на вулканическую и метеорную).

Аэрозольные оптические характеристики вычисляются как сумма по всем блокам. Ради технического удобства расчетов [6] аппроксимируем функции распределения частиц по размерам одномодальными распределениями. В таком случае каждый блок разбивается еще на типы, т. е. частицы одного происхождения, но соответствующие разным модам функции распределения. Окончательно получаем сумму по всем типам аэрозолей. С каждым типом связаны вертикальные профили концентрации частиц, КПП аэрозольного вещества, параметров одномодальной функции распределения по размерам и (для двухслойных частиц) параметров функции внутренней структуры [8]. Все указанные характеристики типа моделируются как случайные.

Выделим следующие типы аэрозолей в рамках модели. Ледяные частицы над Ладожским озером зимой и капельки воды летом можно описать одномодальным распределением [13], причем в рамках модели примем его параметры одинаковыми для льда и воды.

Для стратосферного аэрозоля используем модель [14], где распределение частиц по размерам трехмодально, причем самые мелкие частицы отождествляются с сернокислотными (капли серной кислоты), а средние и крупные – с пылевыми. Таким образом, в стратосфере имеем три типа: сернокислотный, стратосферная пыль-1, стратосферная пыль-2.

Морской аэрозоль – частички соли, образующиеся при испарении брызг морской воды, имеет по [11] двухмодальное распределение. Соответственно получаем типы морская соль-1 и морская соль-2.

Почвенный аэрозоль по [10] имеет трехмодальное распределение.

Наиболее сложна структура городского аэрозоля. По [12] городской аэрозоль моделируется шестимодальным распределением. Первая мода отождествляется с сажей, вторая – с органикой, третья – с сульфатами, остальные три – с пылевыми частицами (мелкими, средними и крупными). Назовем их соответственно пыль-1, пыль-2 и пыль-3. Учитывая условности модели, для простоты отождествим фракции городской пыли и почвенного аэрозоля (почвенной пыли), однако будем учитывать различный вклад этих источников в районе измерений зимой и летом.

Таким образом, нами выделены 12 типов аэрозолей. Все частицы будем моделировать в приближении сферической формы. Для аэрозоля в тропосфере будем учитывать обводнение (оледенение) по [8]. Для учета обводнения частиц в тропосфере и вариаций концентрации серной кислоты в стратосфере использовались статистические модели вертикальных профилей давления, температуры и концентрации водяного пара [15].

Модели КПП аэрозольных веществ

Вариации КПП аэрозольных веществ получим из синтезированных КПП [13, 18, 20]. Синтезированный КПП вычисляется как средневзвешенное значение

$$m(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^N p_i m_i(\lambda)}{\sum_{i=1}^N p_i}, \quad (1)$$

где $m(\lambda)$ – синтезированный КПП (λ – длина волны); $m_i(\lambda)$ – КПП отдельных компонентов; p_i – вес компонентов; N – число компонентов. В качестве веса используют процентное содержание (по массе) вещества в составе смеси. Варьируя вес p_i , моделируем таким образом вариации синтезированного КПП. При этом указанное моделирование будем использовать не только для составных, но и для «простых» веществ, путем синтеза их из данных разных авторов, причем в (1) данные разных авторов считаются равноправными, в иных случаях даются соответствующие пояснения. КПП (кроме H_2SO_4 в стратосфере) моделируются одинаковыми для всех высот.

Модели КПП используемых аэрозольных веществ приведены в табл. 1. В ней вещества располагаются таким образом, что содержащиеся в верхней части таблицы могут использоваться в качестве компонентов более сложных веществ. В крайней правой строке таблицы приведены номера комментариев, которые даются ниже.

Таблица 1

Модели КПП аэрозольных веществ

Вещество	N	Компоненты	p_i	N
Вода	3	[16], [17], [18]	Rd(0;1)	1
Лед	5	[16], [17], [19], [20], [21]	Rd(0;1)	1
SiO ₂	2	[16], [17]	Rd(0;1)	1
Fe ₂ O ₃	2	[17], [21]	Rd(0;1)	1
Al ₂ O ₃	1	[21]	1	2
(NH ₄) ₂ SO ₄	2	[16], [17]	Rd(0;1)	1
Сульфаты	4	(NH ₄) ₂ SO ₄ CaSO ₄ , [21] MgSO ₄ , [21] [13]	Rd(0;0,5) Rd(0;0,25) Rd(0;0,25) Rd(0;1)	3
Сажа	7	[13], [16], [21] [18], 4 типа	Rd(0;0,17) Rd(0;0,12)	1, 4
H ₂ SO ₄	1	[22]	1	5
Органика	2	[10], [16]	Rd(0;1)	1, 6
Стратосферная пыль	5	[16], 3 типа [17], 2 типа	Rd(0;1) Rd(0;1)	1, 6
Пыль (почва)	9	SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ Сульфаты Органика [13], [16], [17], [23]	Ld(0,5;0,1) Ld(0,15;0,1) Ld(0,05;0,1) Ld(0,2;0,1) Ld(0,1;0,1) Rd(0;0,08)	1, 7
Морская соль	3	[13], [16], [17]	Rd(0;1)	1, 6

1. Ради сокращения объема таблицы список веществ с одинаковыми p_i формально написан в одну строку; реально все p_i моделируются независимо.

2. Для этих веществ в «коллекции» лаборатории физики аэрозолей НИИФ имеются единственные данные по КПП. Они будут использованы лишь для синтеза КПП сложных веществ, поэтому отдельная статистика по ним не требуется.

3. При синтезе КПП сульфатов согласно традиционным представлениям преобладающим считается сульфат аммония. Кроме составной модели используется готовая модель сульфатов [13], которая считается равноправной с составной.

4. В [18] приведены 4 типа сажи, описывающие известные сильные вариации ее КПП в зависимости от происхождения.

5. При моделировании КПП серной кислоты использовались данные [22] о его зависимости от концентрации. Вариации КПП серной кислоты моделируются в рамках указанных данных [22] путем вариаций ее концентрации. Эта концентрация определяется по [24] из значений температуры и парциального давления водяного пара на данной высоте в стратосфере.

6. Для этих веществ использовались уже синтезированные КПП по литературным данным.

7. Модель состава пыли (почвы) построена по [16]. Кроме того, используются уже синтезированные модели, которым, ради сохранения вариаций КПП почвы, связанных с вариациями ее состава, приписан суммарный априорный вес 30%.

Модели функций распределения частиц по размерам

Для стратосферного аэрозоля используется модель [23], где для всех трех типов применяется обобщенное логнормальное распределение

$$f(r) = \frac{1}{r_0^{b+1} \sigma \sqrt{2\pi} \exp[\sigma^2(b+1)^2/2]} r^b \exp\left(-\frac{\ln^2(r/r_0)}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

с $b = -3$.

Для тропосферного аэрозоля учтем процессы обводнения (оледенения). Поэтому все моделируемые параметры будем рассматривать как исходные ядра при нулевой влажности [8].

Для чисто водяных и ледяных ядер согласно [13, 16], для типов «морская соль-1» и «морская соль-2» согласно [11] используем логнормальное распределение (формула (2) с $b = -1$).

Для типов городского и почвенного аэрозоля согласно [12] используем обратное гамма-распределение:

$$f(r) = \frac{1}{r_0^{-\nu} \Gamma(\nu)} r^{-1-\nu} \exp(-r/r_0),$$

где $\Gamma(\nu)$ – гамма-функция.

Вариации параметров функций распределения также оценивались по данным указанных работ [9–14, 16, 23].

Параметры функций распределения приведены в табл. 2. Каждому типу аэрозолей соответствуют две строки со значениями параметров: $f(r)$ – « r ноль» и σ для обобщенного логнормального и « r ноль» и ν для обратного гамма-распределений; $m(z)$ и $d(z)$ – среднее и относительное СКО параметров, в общем случае зависящее от высоты (см. ниже).

Таблица 2

Модели функций распределения

Тип	$f(r)$	$m(z)$	$d(z)$, %
Сернокислотный	r_0 МКМ	[23, с.201]	[23, с.50]
	σ	«	20
Стратосферная пыль-1	r_0 МКМ	«	[23, с.50]
	σ	«	30
Стратосферная пыль-2	r_0 МКМ	«	100
	σ	«	50
Водяные (ледяные) ядра	r_0 МКМ	0,67	100
	σ	0,9	10
Морская соль-1	r_0 МКМ	0,35	100
	σ	0,6	30
Морская соль-2	r_0 МКМ	1,9	200
	σ	0,8	30
Сажа	r_0 МКМ	0,21	50
	ν	6	50
Органика	r_0 МКМ	0,21	30
	ν	6	30
Сульфаты	r_0 МКМ	1	20
	ν	5	30
Пыль-1	r_0 МКМ	1,5	30
	ν	5	30
Пыль-2	r_0 МКМ	3	20
	ν	5	40
Пыль-3	r_0 МКМ	15	50
	ν	4	60

Модели вертикальных профилей параметров

Вертикальные профили всех параметров моделируются как независимые. Для корреляционной матрицы параметров, не имеющих в литературе статистики, используется экспоненциальная модель [25]:

$$\text{corr}(z_i, z_j) = \exp(-|z_i - z_j|/R), \quad (3)$$

единственным подлежащим заданию параметром которой является радиус корреляции R .

Для моделирования вертикальных профилей параметров функций распределения аэрозольных частиц по размерам в стратосфере используем данные [23] и модель (3), выбрав радиус корреляции 3 км исходя из характерных размеров аэрозольных слоев в стратосфере. В качестве границы между стратосферным и тропосферным аэрозолем выбрана высота тропопаузы Nd (11 и 1 км). Считаем, что выше этой границы нет тропосферного аэрозоля, а ниже – стратосферного.

В тропосфере, в первом приближении, пренебрегаем изменением параметров функции распределения ядер в зависимости от высоты по сравнению с высотным ходом размеров частиц, обусловленных изменением влажности. Поэтому для тропосферного аэрозоля параметры функций распределения исходных ядер при нулевой влажности для всех высот моделируются одинаковыми.

Модель вертикальных профилей параметров стратосферного аэрозоля, их вариаций взята из [23] и приведена в табл. 3, где $m(z)$ – средний профиль концентрации; $d(z)$ – относительное СКО концентрации; R – радиус корреляции по (3), км.

Таблица 3

Модель вертикальных профилей концентраций аэрозоля в стратосфере

Тип	$m(z)$	$d(z),\%$	$R, \text{ км}$
Сернокислотный аэрозоль	[23, с.201]	200	3
Стратосферная пыль-1	«	200	«
Стратосферная пыль-2	«	300	«

Вертикальный профиль концентрации водяных и ледяных ядер $C(z)$ по [16] аппроксимируется выражением

$$C(z) = C(0) \exp(-z/d_1), \quad \text{если } z < z_1,$$

$$C(z) = C(z_1), \quad \text{« } z_1 < z < z_2,$$

$$C(z) = C(z_1) \exp(-(z - z_2)/d_2), \quad \text{« } z > z_2.$$

Параметры модели (4) и их вариации, полученные по [16], приведены в табл. 4, где m и d – среднее и относительное СКО параметров.

Таблица 4

Модель вертикальных профилей концентраций водяных (ледяных) ядер

Параметр	m	$d, \%$
$C(0), \text{ см}^{-3}$	20	100
$z_1, \text{ км}$	0,5	50
$d_1, \text{ км}^{-1}$	0,25	50
$z_2, \text{ км}$	3	50
$d_2, \text{ км}^{-1}$	1,2	50

Для аэрозолей над Ладожским озером профили концентраций и их вариации оценены по результатам непосредственных измерений в этом районе, выполненных в лаборатории физики аэрозолей. Соотношение аэрозолей различного происхождения (морские, городские, почвенные) оценивалось по экспериментальным данным о химическом составе аэрозолей, а моделирование соотношений

составляющих их типов проводилось по [11] (морские-1 и морские-2) и [12] (6 типов объединенной модели городских и почвенных аэрозолей). Радиус корреляции (3) для всех аэрозолей над Ладожским озером, исходя из характерных размеров слоев наблюдавшейся дымки, выбран 2 км. Значения средних концентраций приведены в табл. 5 и 6. СКО концентраций оценены согласно [11, 12] как 100% для «пыли-2» и «пыли-3» и 300% для остальных типов.

Таблица 5

Средние вертикальные профили концентраций (см^{-3}) тропосферных типов аэрозолей над Ладожским озером летом

Высота, м	Морские-1	Морские-2	Сажа	Органики	Сульфаты	Пыль-1	Пыль-2	Пыль-3
0	0	0	1500	600	10	10	2	0,02
500	0,6	0,006	500	200	2	5	1	0,01
1000	0,3	0,003	200	60	1	2	0,5	0,005
1500	0,06	0,0006	50	20	0,4	1	0,2	0,002
2000	0,02	0,0002	30	15	0,2	0,5	0,1	0,001
2500	0,02	0,0002	40	20	0,2	0,5	0,1	0,001
3000	0,02	0,0002	40	20	0,2	0,5	0,1	0,001
3500	0,01	0,0001	20	15	0,1	0,4	0,08	0,001
4000	0,01	0,0001	10	6	0,1	0,4	0,07	0,001
5000	0,01	0,0001	10	4	0,05	0,3	0,06	0,0007
6000	0,01	0,0001	10	4	0,05	0,3	0,06	0,0007
8000	0,01	0,0001	10	1	0,01	0,3	0,05	0,0006
10000	0	0	0	0	0	0,3	0,05	0,0005
12000	0	0	0	0	0	0,1	0,02	0,0002
15000	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 6

Средние вертикальные профили концентраций (см^{-3}) тропосферных типов аэрозолей над Ладожским озером зимой

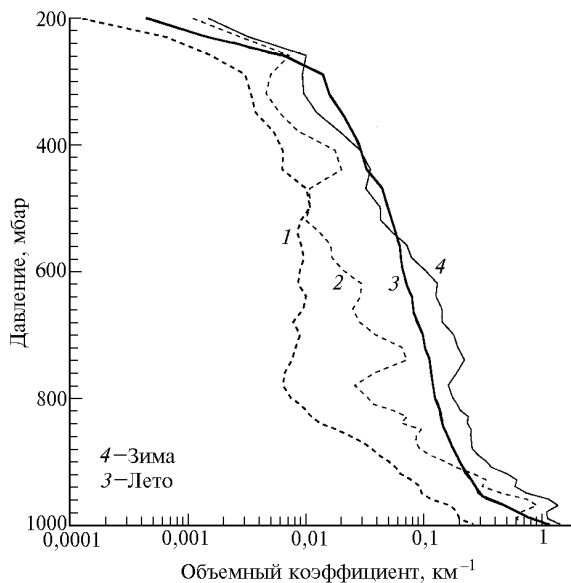
Высота, м	Сажа	Органики	Сульфаты	Пыль-1	Пыль-2	Пыль-3
0	10000	2500	20	6	2	0,003
500	3500	750	6	2	0,5	0,001
1000	1200	250	2,5	1,0	0,2	0,0003
1500	450	100	0,8	0,3	0,1	0,0001
2000	300	75	0,6	0,2	0,05	0,0001
2500	300	75	0,6	0,2	0,05	0,0001
3000	300	75	0,5	0,2	0,05	0,0001
3500	250	50	0,4	0,2	0,04	0,0001
4000	200	40	0,3	0,1	0,03	0
5000	200	40	0,3	0,1	0,03	0
6000	200	40	0,3	0,1	0,02	0
8000	150	30	0,3	0,1	0,02	0
10000	120	25	0,2	0,1	0,02	0
12000	100	20	0,2	0,1	0,01	0
15000	0	0	0	0	0	0

Для учета обводнения (оледенения) аэрозольных частиц в тропосфере используется модель двухслойных сфер [8] с ростом оболочки на исходных ядрах в зависимости от относительной влажности воздуха. Оболочка считается состоящей из воды в области положительных температур и льда – в области отрицательных. Эмпирические параметры, определяющие рост оболочки и ее растворимость, также моделируются как случайные, одинаковые для всех высот, но зависящие от конкретных типов аэрозоля.

В качестве теста модели был выполнен расчет 100 случайных профилей объемных коэффициентов аэрозольного рассеяния и поглощения в видимом диапазоне спектра. На рисунке приведен пример средних вертикальных профилей на длине волны 0,55 мкм. Различия между зимними и летними

ми профилями существенны только в тропосфере. Некоторая изломанность профилей для Ладоги зимой является следствием наличия случайной погрешности при статистическом моделировании и может быть устранена при увеличении числа моделируемых спектров. Однако она является несущественной, потому что СКО приведенных величин составляет 200–300%. Такое СКО вполне соответствует экспериментальным данным и теоретическим представлениям об изменчивости аэрозоля в атмосфере (впрочем, оно непосредственно определяется модельными СКО концентраций). Отметим, что указанный диапазон вариаций захватывает все условия «аэрозольной погоды» – от очень прозрачной атмосферы до сильной дымки. При наличии априорной информации, например о дальности видимости в приземном слое, возможны селекция результатов моделирования и получение средних и СКО, соответствующих условиям конкретных наблюдений.

То, что объемные коэффициенты рассеяния и особенно поглощения для Ладоги зимой получились больше, чем летом, объясняется существенно большей долей сажевых частиц зимой, зафиксированных в экспериментальных наблюдениях (см. табл. 5 и 6). Причина этого – более медленное вымывание зимой сажевых частиц из атмосферы осадками и появление дополнительных их источников. Заметим, что на рисунке заметна сильная корреляция между профилями объемных коэффициентов рассеяния и поглощения.



Средние модельные профили объемных коэффициентов аэрозольного рассеяния (3, 4) и поглощения (1, 2) в тропосфере на длине волны 0,55 мкм

Таким образом, тестирование модели показывает результаты, адекватные данным измерениям и общим теоретическим представлениям об оптических характеристиках аэрозоля над Ладожским озером и их изменчивости, что позволяет использовать модель при решении различных задач оптического мониторинга состояния оз. Ладожское.

1. Кондратьев К.Я., Дружинин Г.В. Комплексные исследования для разработки дистанционных методов слежения за эвтрофированием озер // Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987. С. 6–11.
2. Мелентьев В.В., Поздняков Д.В. Аэрокосмические методы и средства мониторинга окружающей среды // Экодинамика и

- экологический мониторинг Санкт-Петербургского региона в контексте глобальных изменений. СПб: Наука, 1996. С. 388–431.
3. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В., Исаков В.Ю. Радиационно-гидрооптические эксперименты на озерах. Л.: Наука, 1990. 114 с.
4. Васильев О.Б., Гришечкин В.С., Кондратьев К.Я. Спектральные радиационные характеристики свободной атмосферы над акваторией Ладожского озера // Комплексный дистанционный мониторинг озер. Л.: Наука, 1987. С. 187–207.
5. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. М.: Наука, 1976. 319 с.
6. Васильев А.В. Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик однородных сферических аэрозольных частиц // Вестник С.-Петербург. университета. Сер. 4. Физика, химия. I. Однородные частицы. 1996. Вып. 4. № 25. С. 3–11. II. Ансамбли частиц. 1997. Вып. 1. № 4. С. 14–24.
7. Васильев А.В., Ивлев Л.С. Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик двухслойных сферических частиц с однородными ядром и оболочкой // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1552–1561.
8. Васильев А.В., Ивлев Л.С. Эмпирические модели и оптические характеристики аэрозольных ансамблей двухслойных сферических частиц // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 8. С. 856–865.
9. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: Изд-е Томского филиала СО РАН СССР, 1986. 294 с.
10. Андреев С.Д., Ивлев Л.С. Моделирование оптических характеристик аэрозолей приземного слоя атмосферы в области спектра 0,3–15 мкм // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. Ч. 1. Принципы построения модели. № 5. С. 788–795. Ч. 2. Модель состава и структуры аэрозолей. № 8. С. 1227–1235. Ч. 3. Результаты моделирования. № 8. С. 1236–1243.
11. Ивлев Л.С. Структурные и оптические характеристики морских аэрозолей // Прикладные вопросы физики атмосферы. Л., 1989. С. 113–121.
12. Джеттыбаев О., Ивлев Л.С. Оптическая модель атмосферных аэрозолей города // Исследования загрязнения атмосферы Алма-Аты / Под ред. У.М. Султангазина. Алма-Ата: Гылым, 1990. Т. 2. С. 29–49.
13. D'Almeida G.A., Koepke P., Shettle E. Atmospheric aerosols: global climatology and radiative characteristics / Ed. A. Deepak Publication, Hampton, USA, 1991. 549 p.
14. Креков Г.М., Звенигородский С.Г. Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск: Наука, 1990. 278 с.
15. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы / Сер. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
16. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы / Сер. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 2. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
17. The data were tabulated E.P. Shettle of the Naval Research Laboratory and were used to generate the aerosol models which are incorporated into the LOWTRAN, MODTRAN, and FASCODE computer codes. (Data from HITRAN–96 cdrom media).
18. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред: Справочник. Л.: Химия, 1984. 216 с.
19. Гринберг М. Межзвездная пыль. М.: Мир, 1970. 198 с. (пер. с англ. Г.С. Хромова).
20. Warren S.G. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave // Appl. Opt. 1984. V. 23. P. 1206–1225. (data from HITRAN–96 cdrom media).
21. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 359 с.
22. Palmer K.F., Williams D. Optical constants of sulfuric acid; Application to the clouds of Venus? // Appl. Opt. 1975. V. 14. P. 208–219. (data from HITRAN–96 cdrom media).
23. Креков Г.М., Звенигородский С.Г. Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск: Наука, 1990. 278 с.
24. Steele H.M., Hamill P. Effects of temperature and humidity on the growth and optical properties of sulphuric acid-water droplets in the stratosphere // J. Aerosol Sci. 1981. P. 517–528. (data from HITRAN–96 cdrom media).

25. Бирюлина М.С. Моделирование априорного ансамбля решений обратной задачи и устойчивость оптимальных планов озонного спутникового эксперимента // *Метеорология и гидрология*. 1981. N 4. С. 45–51.

A.V. Vasil'ev and L.S. Ivlev. Optical statistic aerosol model of the atmosphere for Lake Ladoga region.

Microphysical aerosol model has been constructed for Lake Ladoga region. The model is based on available literature data and aircraft measurements of number concentration and chemical composition of aerosol particles.