

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.521.3

Развитие эмпирической модели оптических характеристик аэрозоля Западной Сибири

П.Н. Зенкова, С.А. Терпугова, В.В. Польшин, Вас.В. Польшин,
В.Н. Ужегов, В.С. Козлов, Е.П. Яшуева, М.В. Панченко*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 9.01.2021 г.

Представлен новый этап развития обобщенной эмпирической модели оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири. Предложен алгоритм учета функции распределения поглощающего вещества и конденсационной активности аэрозоля в зависимости от размера частиц аэрозоля. Проведен расчет оптических характеристик с переменными значениями комплексного показателя преломления частиц разных размеров при изменении относительной влажности воздуха. На примере типов аэрозольной погоды, относящихся к классу «атмосферные дымки» (фон и пригородная дымка), результаты восстановления коэффициентов направленного рассеяния в области ореола и спектрального хода коэффициентов ослабления сопоставлены с экспериментальными данными.

Ключевые слова: аэрозоль, эмпирическая модель, рассеяние, поглощение; aerosol, empirical model, scattering, absorption, extinction.

Введение

Атмосферный аэрозоль во многом определяет условия распространения оптических волн через атмосферу и, следовательно, оказывает непосредственное влияние на ее радиационный режим [1–6]. В радиационном блоке климатических моделей задача учета вклада аэрозоля — одна из наиболее сложных [6–10]. Оптические свойства атмосферных частиц зависят от их распределения по размерам, структуры и химического состава, которые, в свою очередь, характеризуются значительной пространственной и временной изменчивостью под воздействием внешних геофизических процессов. Очевидно, что на сегодняшний день в моделях (локального, регионального и глобального уровней) отсутствует возможность полноценного учета всех требуемых характеристик аэрозоля, измеренных *in situ*, и их трансформации под воздействием атмосферных процессов. Однако, как показывает наш многолетний опыт, основные характеристики аэрозоля удается с определенной точностью восстановить при помощи эмпирических моделей, используя ограниченный (оптимальный) набор измеряемых входных параметров [11–17].

В соответствии с накопленным экспериментальным материалом [11] была разработана эмпирическая региональная динамическая модель вертикального профиля аэрозольного коэффициента рассеяния в слое 0–5 км [11, 17]. После длительных измерений содержания поглощающего вещества («сажи») в тропосфере Западной Сибири [11] в модель оптических характеристик аэрозоля был добавлен учет его поглощающих свойств [17]. Предполагалось, что «сажа» равномерно распределена по объему аэрозольных частиц (т.е. оптические постоянные смеси не зависят от размера частиц), а также что 90% поглощающего вещества приходится на субмикронную, а 10% — на грубодисперсную фракцию. Изменение объемной концентрации частиц при изменении относительной влажности воздуха RH рассчитывалось по формуле Хенела [18] с использованием данных измерений параметра конденсационной активности γ .

Развитие приборной базы [11] позволило в 2014 г. ввести в мониторинговый режим измерений на аэрозольной станции ИОА СО РАН распределения по размерам поглощающих частиц и, следовательно, обеспечить возможность их учета при восстановлении оптических характеристик.

В настоящей статье обсуждается следующий этап развития эмпирической модели оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири [17, 19]. Рассматривается процедура ввода в ранее разработанную модель данных многолетних измерений распределения по размерам частиц поглощающего вещества. Добавлен блок расчета тран-

* Полина Николаевна Зенкова (zpn@iao.ru); Светлана Александровна Терпугова (swet@iao.ru); Виктор Викторович Польшин (victor@iao.ru); Василий Викторович Польшин (rv@iao.ru); Виктор Николаевич Ужегов (uzhegov@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Елена Петровна Яшуева (helen@iao.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru).

сформации спектра размеров с применением теории равновесного конденсационного укрупнения атмосферного аэрозоля А.Г. Лактионова [20], в котором моделируются оптические характеристики с переменными значениями комплексного показателя преломления в зависимости от размера частиц. Для иллюстрации представлены результаты восстановления оптических характеристик класса дымок и их сравнения с данными наблюдений.

1. Общая схема формирования модели

Базой для формирования алгоритма оценки (восстановления) оптических характеристик, необходимых для радиационных расчетов, является эмпирическая модель, в основе которой лежит статистически обеспеченный массив экспериментальных данных, полученных в результате многолетних измерений [17]. Аппаратура, методики калибровки и проведения измерений описаны в [11].

Вход в модель осуществляется следующим образом. Для конкретного сезона по данным текущих измерений коэффициента рассеяния сухой основы частиц $\sigma_d(\lambda = 0,51 \text{ мкм})$ и массовой концентрации поглощающего вещества $M_{ВС}$ определяется параметр P (отношение массовой концентрации поглощающего вещества к массовой концентрации субмикронного аэрозоля, которая для субмикронной фракции пропорциональна коэффициенту рассеяния). Далее в соответствии с предложенной классификацией разбиения атмосферных ситуаций в координатах « $\sigma_d - P$ » определяется соответствующий тип аэрозольной погоды («Фон», «Пригородная дымка», «Смог» и «Дымная мгла») [19, 20]. Внутри

каждого типа по данным многолетних измерений заданы средние характеристики параметров функций распределения частиц и массовой концентрации поглощающего вещества по размерам, величина параметра конденсационной активности и зависимость фактора конденсационного роста для частиц.

Восстановление оптических характеристик

На рис. 1 представлена общая схема восстановления оптических характеристик атмосферного аэрозоля с учетом его поглощающих и гигроскопических свойств.

Вычислительный блок состоит из трех основных модулей: микрофизического, оптического и учета влияния влажности. В микрофизическом модуле рассчитывается комплексный показатель преломления сухого и влажного аэрозоля с учетом спектра размеров поглощающих частиц. В модуле учета влажности моделируется трансформация микрофизических характеристик аэрозольных частиц при изменении относительной влажности воздуха. В оптическом модуле по формулам Ми для сферических частиц восстанавливаются оптические характеристики аэрозоля при нулевой и заданной относительной влажности воздуха.

Распределения по размерам сухой основы аэрозоля и поглощающего вещества. В соответствии с данными измерений счетной концентрации аэрозоля распределение по размерам сухих частиц аппроксимируется суперпозицией двух логнормальных функций, описывающих субмикронную и крупнодисперсную фракции [19, 21]:

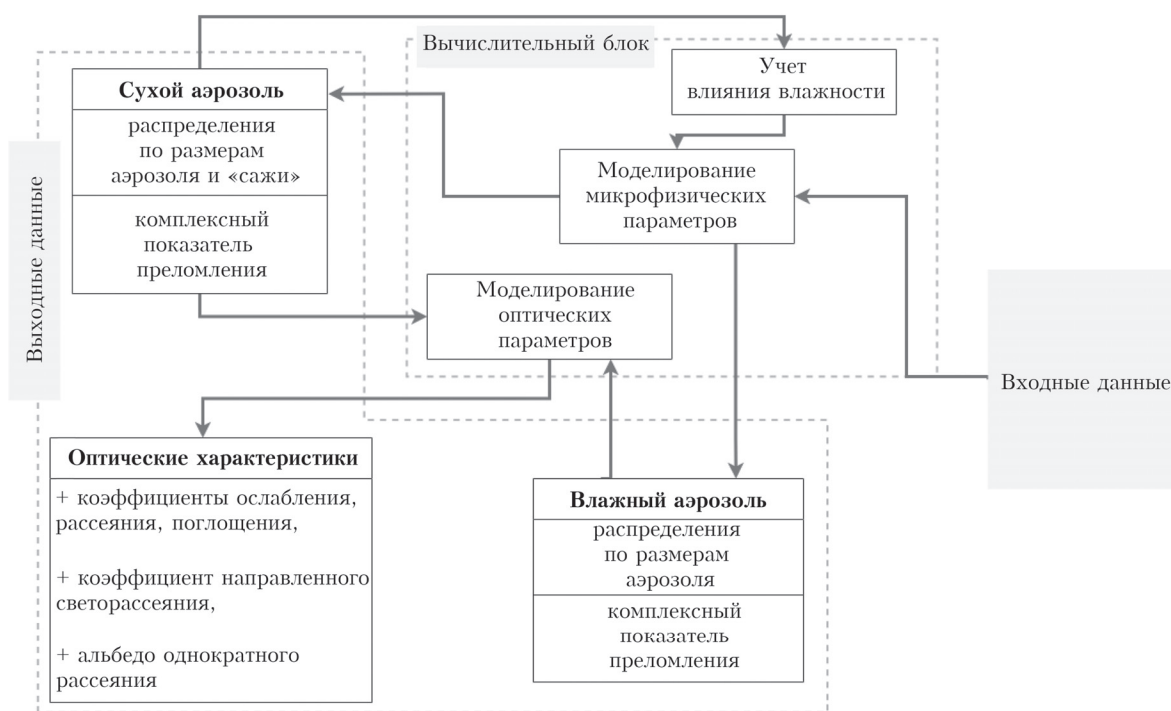


Рис. 1. Обобщенная блок-схема восстановления оптических характеристик аэрозоля

$$\frac{dV_{\text{aer}}}{dr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{r \cdot \ln S_i} \exp\left(-\frac{\ln^2(r/r_i)}{2\ln^2 S_i}\right), \quad (1)$$

где r (мкм) – радиус частицы; $\ln S_i$ – дисперсия распределения i -й моды; r_i , V_i (мкм³/см³) – модальные значения радиуса и амплитуды i -й моды соответственно.

Амплитуда V_i определяется таким образом, чтобы рассчитанный по теории Ми коэффициент направленного светорассеяния $\mu_d(\varphi = 45^\circ, \lambda = 0,51 \text{ мкм})$ совпадал с измеряемым значением. Массовая концентрация аэрозоля M_A рассчитывается пропорционально величине коэффициента направленного рассеяния сухого вещества $\mu_d(45^\circ)$ [19].

Согласно данным о содержании поглощающего вещества в субмикронной фракции определены параметры его логнормального распределения по размерам [19]:

$$\frac{dV_{\text{BC}}}{dr} = A_{\text{BC}} \exp\left(-\frac{\ln^2(r/r_{\text{BC}})}{2\ln^2 S_{\text{BC}}}\right). \quad (2)$$

Амплитуда распределения A_{BC} вычисляется через объемную концентрацию поглощающего вещества [22].

Комплексный показатель преломления сухого аэрозоля. Комплексный показатель преломления сухой основы аэрозоля $m_d(r) = n_d(r) - i\chi_d(r)$ моделируется как функция радиуса частиц по правилу смеси [23]:

$$n_d(r) = \frac{n_{\text{aer}}V_{\text{aer}}(r) + n_{\text{BC}}V_{\text{BC}}(r)}{V_{\text{aer}}(r)}, \quad (3)$$

$$\chi_d(r) = \frac{\chi_{\text{BC}}V_{\text{BC}}(r)}{V_{\text{aer}}(r)}, \quad (4)$$

где $V_{\text{BC}}(r)$ и $V_{\text{aer}}(r)$ – объемные концентрации поглощающего вещества и аэрозоля для каждого радиуса; $n_{\text{aer}} = 1,5$, $n_{\text{BC}} = 1,8$ и $\chi_{\text{BC}} = 0,74$ [22].

Трансформация характеристик аэрозоля при изменении относительной влажности воздуха. На предыдущих этапах формирования эмпирической модели зависимость конденсационной активности частиц от их размера не учитывалась [11, 17]. Исследования влажностных зависимостей оптических параметров атмосферного аэрозоля [20, 24–28] дают возможность изучить изменчивость частиц разного размера во всем диапазоне относительной влажности, реализующемся в атмосфере. Для более детального описания трансформации спектра размеров аэрозоля при вариациях относительной влажности воздуха в схему восстановления включена следующая процедура.

Изменение характеристик аэрозольных частиц при росте относительной влажности воздуха моделируется в рамках полумпирической теории рав-

новесного конденсационного укрупнения атмосферного аэрозоля А.Г. Лактионова [20]:

$$r_w = r_d \left(1 - B \frac{E_v(r_d)}{RH}\right)^{1/3}, \quad (5)$$

где r_d – радиус сухой частицы; r_w – радиус частицы при относительной влажности воздуха RH ; $B = 1,13 - 0,422RH$ – коэффициент для континентального аэрозоля III типа [20]. Зависимость фактора конденсационного роста от размера $E_v(r_d)$ описывается одномодальным распределением [20]:

$$E_v(r_d) = A \exp\left(-0,5 \left[\frac{\ln(r_d/r_m)}{s}\right]^2\right). \quad (6)$$

Функция $E_v(r_d)$ характеризуется максимумом при некотором радиусе r_m ; s – полуширина распределения. Параметры $E_v(r_d)$ подбираются исходя из сравнения вычисляемых и средних значений параметра конденсационной активности γ соответствующей реализации аэрозольной погоды [19].

В [29] был определен оптимальный диапазон значений параметров увлажнения частиц, входящих в формулу (6), для всех типов аэрозольной погоды и рассмотрены четыре значения полуширины распределения: $s = 0,3; 0,4; 0,5$ и $0,6$. На этапах тестирования алгоритма учета влажности было выявлено, что при малых значениях s происходит резкий рост частиц в узком диапазоне размеров; с увеличением RH он становится все более выраженным. Поскольку s отвечает за диапазон размеров увлажняющихся частиц, то при $s > 0,6$ в процессе роста относительной влажности воздуха, в особенности при $RH \geq 85\%$, конденсационная активность проявляется у частиц не только субмикронной, но и среднedisперсной фракции. Серия вычислительных экспериментов показала, что наиболее оптимальный вариант $s = 0,5$.

Комплексный показатель преломления влажного аэрозоля. Комплексный показатель преломления аэрозоля при относительной влажности воздуха RH $m_w(r) = n_w(r) - i\chi_w(r)$ рассчитывается как функция радиуса частиц по правилу смеси в предположении, что их объем при изменении влажности увеличивается только за счет конденсации паров воды [23]:

$$n_w(r) = \frac{n_d(r)V_d(r) + n_{\text{water}}V_{\text{water}}}{V_w(r)}, \quad (7)$$

$$\chi_w(r) = \frac{\chi_d(r)V_d(r)}{V_w(r)}, \quad (8)$$

где $n_{\text{water}} = 1,33$. Показатель поглощения воды $\chi_{\text{water}} = 0$, поэтому в формуле (8) он опущен.

Примеры рассчитанных показателей поглощения и преломления приведены на рис. 2.

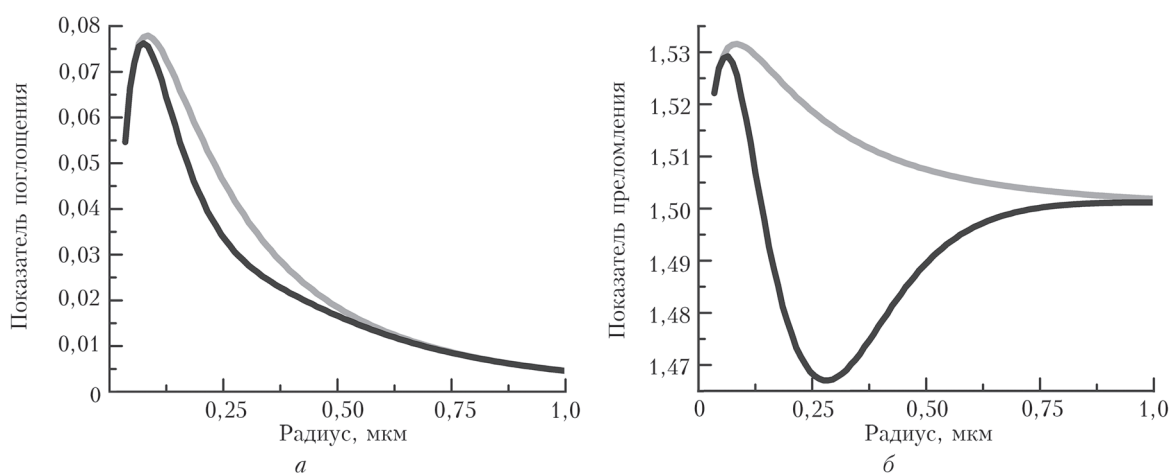


Рис. 2. Показатели поглощения (а) и преломления (б) как функции радиуса сухой частицы при $RH = 70\%$: серая кривая – сухой аэрозоль, черная – увлажненный (летняя «пригородная дымка», табл. 1)

Таблица 1

Средние значения входных параметров, используемых при восстановлении оптических характеристик аэрозоля, для двух типов аэрозольной погоды

Параметры	Лето		Осень		Зима		Весна	
	«Пригородная дымка»	«Фон»	«Пригородная дымка»	«Фон»	«Пригородная дымка»	«Фон»	«Пригородная дымка»	«Фон»
P	0,075	0,038	0,085	0,04	0,08	0,045	0,07	0,04
$\sigma_d, \text{Мм}^{-1}$	42	70	43	62	60	70	52	60
γ	0,21	0,23	0,3	0,3	0,29	0,3	0,3	0,43
$RH, \%$	67	67	70	70	80	80	55	55

Восстановление оптических характеристик.

Расчет комплекса спектральных оптических характеристик (коэффициенты рассеяния и ослабления, угловые зависимости компонент матрицы рассеяния, альбеда однократного рассеяния и средний косинус индикатрисы рассеяния) осуществляется по теории Ми в предположении сферичности частиц [30].

2. Восстановление оптических свойств аэрозоля класса «атмосферные дымки»

По данным многолетних измерений было показано, что в приземном слое атмосферы в течение года более чем в 80% случаев наблюдается состояние, относящееся в рамках нашей классификации к «атмосферным дымкам» [19]. Поэтому на первом этапе апробации мы провели восстановление комплекса оптических характеристик в типах аэрозольной погоды «Фон» и «Пригородная дымка». При восстановлении оптических характеристик использовались следующие входные данные: средние значения коэффициента рассеяния сухой основы σ_d , параметров P (табл. 1) и функций распределения по размерам сухой основы аэрозоля [19, 31] и поглощающего вещества [19]; характеристики конденсационного роста аэрозоля, анализ которых приведен в [29].

Для того чтобы оценить качество учета в модели соотношения концентраций субмикронных и грубодисперсных частиц, мы воспользовались

параметром $I_{20}/I_{1,2}$, где I_{20} – значение коэффициента направленного светорассеяния под углом $\varphi = 20^\circ$, $I_{1,2}$ – под углом $\varphi = 1,2^\circ$.

В табл. 2 приведены средние значения и среднеквадратичные отклонения (СКО) параметров $I_{20}/I_{1,2}$ из [19], а также восстановленные $I_{20}/I_{1,2}$ для разных сезонов года в классе «атмосферные дымки». Видно, что $I_{20}/I_{1,2}$, восстановленные по средним значениям, вполне укладываются в диапазон изменчивости измеренного параметра $I_{20}/I_{1,2}$ в сезонных массивах. В то же время следует отметить, что для зимы восстановленное значение $I_{20}/I_{1,2}$ заметно меньше средних значений, полученных по данным измерений. В определенной степени это может быть связано с проблемами описания функции распределения по данным фотоэлектрического счетчика (завышенные концентрации частиц грубодисперсного диапазона) в периоды наиболее сильных морозов, но в настоящее время причина такого расхождения неизвестна и требует проведения дополнительных исследований.

Таблица 2

Средние [19] и восстановленные значения $I_{20}/I_{1,2}$ для разных сезонов в классе атмосферных дымок

Сезон	«Фон»		«Пригородная дымка»	
	измеренные \pm СКО	восстановленные	измеренные \pm СКО	восстановленные
Зима	0,150 \pm 0,068	0,059	0,135 \pm 0,061	0,078
Весна	0,068 \pm 0,050	0,056	0,056 \pm 0,040	0,044
Лето	0,053 \pm 0,023	0,062	0,039 \pm 0,016	0,055
Осень	0,078 \pm 0,035	0,076	0,066 \pm 0,044	0,046

Ранее было показано, что результаты расчета угловых коэффициентов рассеяния в области ореола и коэффициентов ослабления хорошо согласуются с измеренными только в видимом диапазоне спектра 0,45–0,83 мкм [19]. Это обусловлено тем, что в атмосфере практически всегда присутствуют крупные аэрозольные частицы различного происхождения (пыль, пыльца и т.д.) с радиусами свыше 15 мкм [32, 33], определение концентрации которых может выходить далеко за пределы возможностей измерений с помощью фотоэлектрического счетчика. Наши измерения коэффициентов рассеяния проводятся в диапазоне углов 1,2–20°. Известно, что 90% рассеянной энергии частиц (первый дифракционный максимум) с $r \geq 15$ мкм находится

в диапазоне углов рассеяния $\phi < 1^\circ$ и не регистрируется при измерении индикатрисы в области ореола. Понятно, что этот недостаток информации сказывается в первую очередь в летних условиях открытой подстилающей поверхности (пыль, пыльца деревьев, семена трав и т.д.), и особенно вблизи населенных пунктов.

Также было проведено сравнение восстановленных $\beta_{\text{mod}}(\lambda)$ и измеренных коэффициентов ослабления субмикронной фракции аэрозоля на приземной трассе $\beta_{\text{sub}}(\lambda)$ [19]:

$$\beta_{\text{sub}}(\lambda) = \beta(\lambda) - \beta(3,9). \quad (9)$$

На рис. 3 представлены результаты сравнения спектрального хода $\beta_{\text{sub}}(\lambda)$ и $\beta_{\text{mod}}(\lambda)$ в классе дымок.

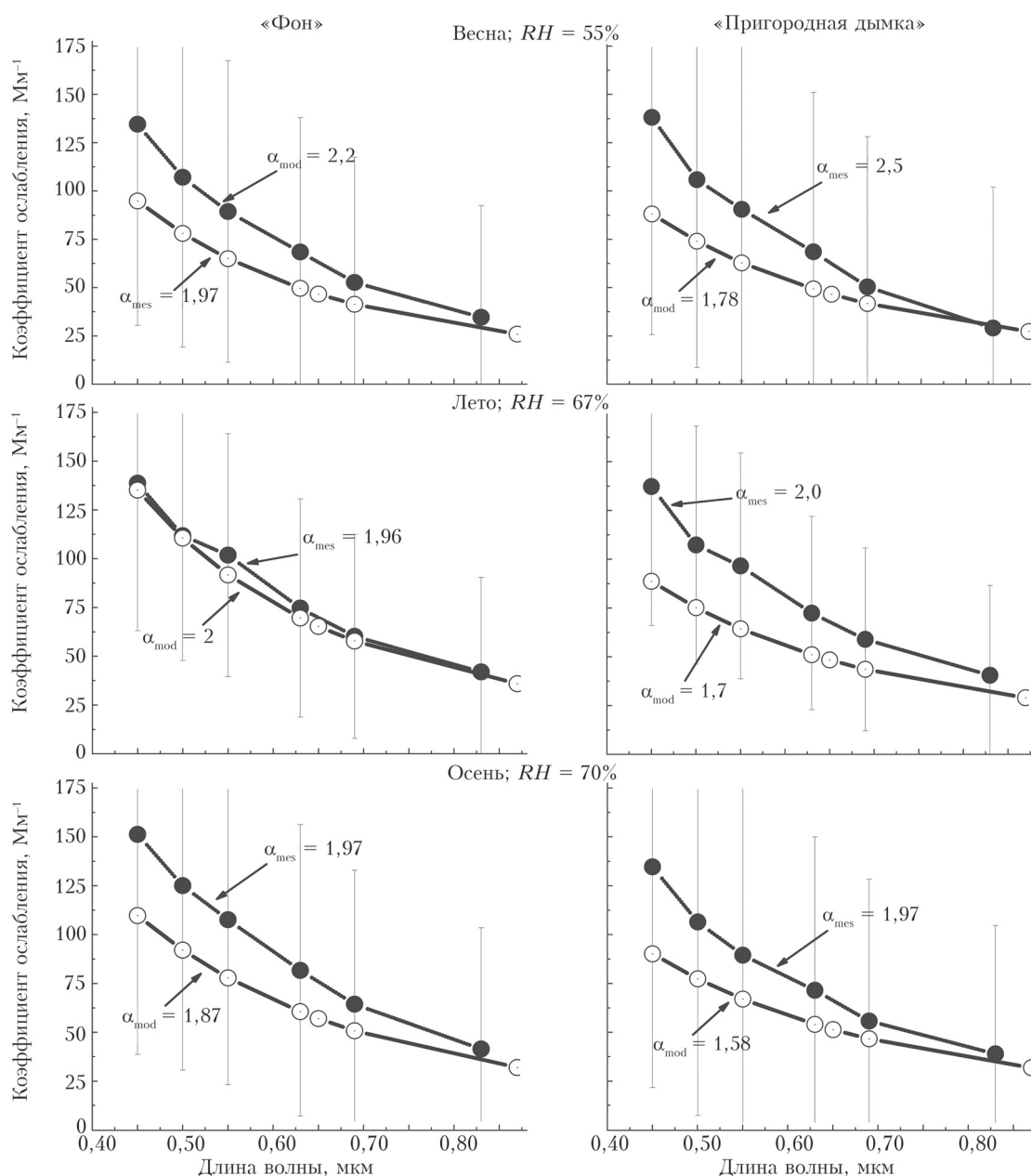


Рис. 3. Восстановленные (кривые с белыми символами) и измеренные (кривые с черными символами) коэффициенты аэрозольного ослабления в классе «атмосферные дымки» в видимом диапазоне длин волн и рассчитанные по ним значения параметра Агстрема α

Параметр Ангстрема α в видимом диапазоне длин волн для спектральных зависимостей $\beta_{\text{sub}}(\lambda)$ и $\beta_{\text{mod}}(\lambda)$ рассчитывался методом наименьших квадратов:

$$\beta_{\text{sub}}(\lambda) = B\lambda^{-\alpha}. \quad (10)$$

Из рис. 3 видно, что восстановленные средние значения β_{mod} вполне укладываются в диапазон изменчивости данных измерений β_{sub} на протяженной трассе, а параметры Ангстрема α сопоставимы друг с другом.

Заключение

В настоящей работе представлена схема этапа развития эмпирической модели оптических характеристик аэрозоля. В модель введена процедура учета содержания поглощающего вещества и конденсационной активности частиц в зависимости от их размера, что обеспечивает возможность оценки необходимых оптических характеристик для каждой конкретной атмосферной ситуации. Для примера восстановление параметров аэрозоля и их сравнение с данными измерений проведены для средних значений при состояниях атмосферы, которые относятся к классу «атмосферные дымки». По результатам сравнения показано, что наблюдается удовлетворительное согласие восстановленных и измеренных на открытой протяженной трассе значений спектральных коэффициентов ослабления субмикронного аэрозоля в диапазоне длин волн 0,45–0,83 мкм.

На основе серии модельных экспериментов выяснилось, что используемые входные параметры модели не позволяют корректно определить соотношение субмикронной и грубодисперсной фракций, хотя мы и попадаем в диапазон допустимых значений параметра $I_{20}/I_{1,2}$ (см. табл. 2). Учитывая то обстоятельство, что в реальной атмосфере практически всегда присутствуют гигантские частицы различного происхождения, вряд ли это препятствие можно преодолеть, используя в качестве входных параметров модели только характеристики, регистрируемые в локальных объемах. Полагаем, что дополнение набора входных параметров данными измерений аэрозольных коэффициентов ослабления на протяженной трассе позволит нам приблизиться к решению этой проблемы и расширить спектральный диапазон восстанавливаемых характеристик.

Многолетние исследования выполнялись в рамках государственного задания ИОА СО РАН, а разработка модели восстановления комплекса оптических характеристик с учетом поглощающих и гигроскопических свойств аэрозоля осуществлялась в рамках задач, выполняемых при финансовой поддержке РФФИ (соглашение № 19-77-20092).

1. *Атмосферный аэрозоль и его влияние на перенос излучения* / под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 119 с.

2. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С. О воздействии антропогенного аэрозоля на климат // Докл. РАН. 1995. Т. 340, № 1. С. 98–100.
3. Розенберг Г.В. Рассеяние света в земной атмосфере // Успехи физ. наук. 1960. Т. 71, вып. 2. С. 173–213.
4. Розенберг Г.В., Горчаков Г.И., Георгиевский Ю.С., Любовецова Ю.С. Физика атмосферы и проблема климата. М.: Наука, 1980. С. 216–257.
5. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 1. Образование, свойства аэрозоля и их трансформация // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 1. С. 5–22.
6. Кондратьев К.Я. От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля. 7. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие и климат // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 7. С. 535–556.
7. Hansen J., Sato M., Ruedy R. Radiative forcing and climate response // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102, N 6. P. 6831–6864.
8. Bullrich K. Scattering radiation in the atmosphere and the natural aerosol // Adv. Geophys. 1964. V. 10. P. 99–260.
9. Zhang B.W. The effect of aerosols to climate change and society // J. Geosci. Environ. Protect. 2020. N 8. P. 55–78. DOI: 10.4236/gep.2020.88006.
10. Kambezidis H.D., Cachorro V.E., Kinne S., Krishnamoorthy K., de Leeuw G., Vitale V. Atmospheric aerosols and climate // Adv. Meteorol. 2010. P. 2. DOI: 10.1155/2010/708782.
11. Панченко М.В., Кабанов М.В., Пхалагов Ю.А., Белан Б.Д., Козлов В.С., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Яушева Е.П., Аршинов М.Ю., Симоненков Д.В., Шмаргунов В.П., Чернов Д.Г., Турчинович Ю.С., Польшкин Вас.В., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Зенкова П.Н. Комплексные исследования тропосферного аэрозоля в ИОА СО РАН (этапы развития) // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 9. С. 703–716. DOI: 10.15372/AOO20190904; Panchenko M.V., Kabanov M.V., Pkhlagov Yu.A., Belan B.D., Kozlov V.S., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Uzhegov V.N., Shchelkanov N.N., Pol'kin V.V., Terpugova S.A., Tolmachev G.N., Yausheva E.P., Arshinov M.Yu., Simonenkov D.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G., Turchinovich Yu.S., Pol'kin Vas.V., Zhuravleva T.B., Nasrtidinov I.M., Zenkova P.N. Integrated studies of tropospheric aerosol at the Institute of Atmospheric Optics (development stages) // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 1. P. 27–41.
12. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
13. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Аэрозольные модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 104 с.
14. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля // Томск: Изд-во ТФ СО АН СССР, 1986. 295 с.
15. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А. Двухпараметрическая модель аэрозольного ослабления для атмосферных дымок // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12, № 12. С. 1089–1092.
16. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля // Новосибирск: Наука, 1982. 200 с.
17. Панченко М.В., Козлов В.С., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П.

- Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
18. Hanel G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // Adv. Geophys. 1976. V. 19. P. 73–188.
 19. Panchenko M.V., Kozlov V.S., Pol'kin V.V., Pol'kin Vas.V., Terpugova S.A., Uzhegov V.N., Chernov D.G., Shmargunov V.P., Yausheva E.P., Zenkova P.N. Aerosol characteristics in the near-ground layer of the atmosphere of the city of Tomsk in different types of aerosol weather // Atmosphere. 2020. V. 11, N 1. P. 20–39. DOI: 10.3390/atmos11010020.
 20. Лактионов А.Г. Равновесная гетерогенная конденсация. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 160 с.
 21. Панченко М.В., Полькин В.В., Полькин Вас.В., Козлов В.С., Яушева Е.П., Шмаргунов В.П. Распределение по размерам «сухой основы» частиц в приземном слое атмосферы пригородного района г. Томска в рамках эмпирической классификации типов «аэрозольной погоды» // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 7. С. 539–547. DOI: 10.15372/AOO20190705; Panchenko M.V., Pol'kin V.V., Pol'kin Vas.V., Kozlov V.S., Yausheva E.P., Shmargunov V.P. Size distribution of dry matter of particles in the surface atmospheric layer in the suburban region of Tomsk within the empirical classification of aerosol weather types // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 6. P. 655–662.
 22. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 256 с.
 23. Ивлев Л.С., Попова С.И. Оптические константы вещества атмосферного аэрозоля // Изв. вузов. Физика. 1972. № 5. С. 91–97.
 24. Mikhailov E., Vlasenko S., Martin S.T., Koop T., Poschl U. Amorphous and crystalline aerosol particles interacting with water vapor: Conceptual framework and experimental evidence for restructuring, phase transitions and kinetic limitations // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, N 24. P. 9491–9522.
 25. Topping D.O., McFiggans G.B., Coe Y. A curved multi-component aerosol hygroscopicity model framework: Part 2 – Including organic compounds // Atmos. Chem. Phys. 2005. N 5. P. 1223–1242.
 26. Ramanathan V., Crutzen P.J., Kiehl J.T., Rosenfeld D. Aerosols, climate and the hydrological cycle // Science. 2001. V. 294. P. 2119–2124.
 27. Zieger P., Fierz-Schmidhauser R., Gysel M., Strom J., Henne S., Yttri K.E., Baltensperger U., Weingartner E. Effects of relative humidity on aerosol light scattering in the Arctic // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2010. V. 10, N 2. P. 3659–3698.
 28. Martin S.T. Phase transitions of aqueous atmospheric particles // Chem. Rev. 2000. V. 100, N 6. P. 3403–3453.
 29. Zenkova P.N., Terpugova S.A., Pol'kin Vas.V., Pol'kin V.V., Kozlov V.S., Yausheva E.P., Panchenko M.V. Model calculation of the aerosol optical characteristics at different variants of considering hygroscopic and absorbing properties on the example of atmospheric hazes // Proc. SPIE. 2020. DOI: 10.1117/12.2574942.
 30. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.
 31. Pol'kin V.V., Panchenko M.V. Fitting of the particle size distributions by lognormal functions in the frameworks of empirical classification of the “aerosol weather” types // Proc. SPIE. 2019. DOI: 10.1117/12.2541115.
 32. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. Исследование одновременных вариаций аэрозольного ослабления радиации на горизонтальных и наклонных трассах // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 4. С. 321–327.
 33. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. О роли дисперсных фракций приземной дымки в ослаблении видимого и инфракрасного излучения // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 1. С. 19–22.

P.N. Zenkova, S.A. Terpugova, V.V. Pol'kin, Vas.V. Pol'kin, V.N. Uzhegov, V.S. Kozlov, E.P. Yausheva, M.V. Panchenko. Development of the empirical model of optical characteristics of aerosol in Western Siberia.

A scheme of the new stage of the development of a generalized empirical model of optical characteristics of tropospheric aerosol in Western Siberia is described. An algorithm is suggested for accounting the particle size distribution function of absorbing matter and the condensation activity of aerosols. Optical characteristics have been calculated with the complex refractive index of particles of different sizes variable with the relative air humidity. Using the “haze” type of the “aerosol weather” as an example, the results of model calculation are compared with the average experimental data on the angular scattering coefficient in a small-angle range and the spectral behavior of the aerosol extinction coefficients.