

Н.Н. Щелканов, Ю.А. Пхалагов

ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЭРОЗОЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ ДЛЯ АТМОСФЕРНЫХ ДЫМОК

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 9.08.99 г.

Предлагается эмпирическая модель, которая позволяет рассчитывать аэрозольное ослабление в приземных дымках в области спектра 0,4–12 мкм по измеренным значениям коэффициентов ослабления на двух длинах волн в видимой области спектра. Анализируются возможности использования модели в различных метеорологических условиях. Показано, что данная модель удовлетворительно описывает экспериментальные и расчетные модели аэрозольного ослабления для разных климатических зон и большинства типов оптической погоды (дымки, туманные дымки, дымка с моросью, дымка с обложным дождем, дымка со снегом или крупой, ледяной туман).

1. Введение

Аэрозоль, пары воды, парниковые газы и облачность играют определяющую роль в формировании оптического состояния атмосферы. Расчеты изменчивости погоды и климата Земли осуществляются с помощью нескольких десятков различных версий радиационных блоков моделей общей циркуляции атмосферы, однако только в шести из них осуществляется учет оптических свойств аэрозоля. Современные модели требуют существенного повышения точности количественного описания характеристик всех оптически значимых компонентов атмосферы и их пространственно-временной изменчивости. Более того, практически все используемые при радиационных расчетах оптические модели являются слабо динамичными. Так, в аэрозольных блоках в лучшем случае осуществляется только весьма грубая градация по сезонам года и географическим зонам. В настоящее время особое внимание должно быть обращено на разработку и создание динамических моделей глобального масштаба, пригодных для использования в любых условиях.

Разработка аэрозольных эмпирических моделей является одной из наиболее важных задач атмосферной оптики. Наибольший интерес представляют модели для атмосферных дымок, которые являются типичными аэрозольными образованиями в пограничном слое атмосферы и занимают ~ 90% времени в большинстве географических районов [1]. Обычно для расчета коэффициентов аэрозольного ослабления в инфракрасном диапазоне спектра по измеренным их значениям в видимой области используются однопараметрические модели. Входным параметром таких моделей часто является коэффициент аэрозольного ослабления в участке спектра 0,55 мкм, что связано с простотой его вычисления по формуле Кошмидера $\alpha(0,55) = 3,91/S_M - \sigma_{\text{ред}}(0,55)$, где S_M – метеорологическая дальность видимости, $\sigma_{\text{ред}}(0,55)$ – коэффициент молекулярного (рэлеевского) рассеяния. Однопараметрические модели не удается построить путем выделения типов оптической погоды по одному оптическому признаку в видимой области спектра. Это связано с тем, что ослабление в инфракрасной области спектра определяется в основном грубодисперсным аэрозодем, а в видимой области спектра – субмикронным и грубодисперсным. Поэтому приходится дополнительно использовать сезонные, географические, синоптические и метеорологические признаки. Использование этих призна-

ков основано на том, что для разных регионов, сезонов года и типов оптической погоды в видимой области спектра соотношение между вкладами грубодисперсного и субмикронного аэрозоля в коэффициенты ослабления существенно различается. В связи с этим однопараметрические модели, полученные для определенного географического региона, не могут претендовать на применимость в иных районах без соответствующей экспериментальной проверки.

Примером использования географического признака при моделировании аэрозольного ослабления может служить эмпирическая модель для прибрежной зоны Черного моря [2]. Географический и сезонный признаки применялись при построении однопараметрической модели для аридной зоны [3], где были обнаружены сезонные особенности спектрального хода коэффициентов аэрозольного ослабления. Синоптические и метеорологические признаки использовались в известной модели Филиппова–Макарова–Иванова [4], которая имеет вид

$$\alpha(\lambda) = 3,91 (n_0 + n_1 \lambda^{-n_2}) / S_M, \quad (1)$$

где $\alpha(\lambda)$ – коэффициент аэрозольного ослабления на длине волны λ ; S_M – метеорологическая дальность видимости; n_0 , n_1 , n_2 – параметры подгонки. Эта модель включает в себя 12 типов атмосферных замутнений: 5 типов дымок, 3 типа туманных дымок, дымку с моросью, дымку с обложным дождем, дымку со снегом или крупой и ледяной туман. Каждый тип модели характеризуется диапазонами S_M , температуры и относительной влажности воздуха, а также имеет свой набор параметров подгонки. В модели (1) S_M изменяется от 1 до 50 км, температура воздуха – от –35 до +25 °С, относительная влажность воздуха – от 30 до 100%, n_0 – от 0,004 до 0,56, n_1 – от 0,35 до 0,79, n_2 – от 0,39 до 2.

Использование этой модели для расчета аэрозольного ослабления в ИК-области спектра показало, что для ряда атмосферных замутнений она дает заниженные значения $\alpha(\lambda)$. Кроме того, данная модель не работает при метеорологической дальности видимости более 50 км и температуре воздуха больше 25 °С, что является характерным, например, для аридной зоны. Эти обстоятельства привели к разработке однопараметрических сезонных моделей аэрозольного ослабления [3].

Главным недостатком однопараметрических моделей является трудность в определении условий использования

той или иной модели в переходные периоды года (при переходе от весны к лету и от лета к осени и т.д.), что приводит к увеличению ошибок восстановления искомым коэффициентов аэрозольного ослабления. Недостатком этих моделей является также неучет изменчивости концентрации субмикронной фракции аэрозольных частиц в течение выделенного сезона, которая в большей степени определяет вариации коэффициента аэрозольного ослабления в видимой области спектра и значительно в меньшей степени – в ИК-области. Попытки исключить вариации $\alpha(\lambda)$ в видимой области спектра за счет изменчивости концентрации субмикронной фракции частиц привели к построению двухпараметрической модели аэрозольного ослабления.

2. Физические основы построения модели

Физические основы построения двухпараметрической модели были впервые представлены нами в докладе на IX Всесоюзном симпозиуме по распространению лазерного излучения в атмосфере в 1987 г. [5], а подробно изложены в [6]. Они базируются на том, что разность между значениями двух коэффициентов аэрозольного ослабления в видимой области спектра слабо зависит от распределения по размерам грубодисперсных частиц, а в основном определяется распределением по размерам субмикронных частиц.

Предположим, что в видимой области спектра имеются две длины волны λ_1 и λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$), на которых ослабление определяется грубодисперсными и субмикронными частицами. Требуется рассчитать аэрозольное ослабление в ИК-области на третьей длине волны λ_3 ($\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$), на которой ослабление определяется только грубодисперсными частицами. Для того чтобы это сделать наилучшим образом, необходимо в участках спектра λ_1 и λ_2 исключить ослабление субмикронными частицами. Оказывается, это можно сделать, используя разность между двумя коэффициентами аэрозольного ослабления на длинах волн λ_1 и λ_2 . Для объяснения такой возможности обратимся к рис. 1.

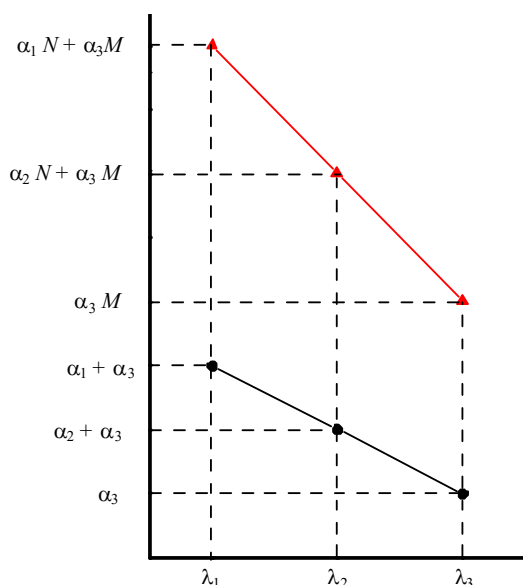


Рис. 1. К обоснованию двухпараметрической модели аэрозольного ослабления

Пусть коэффициенты ослабления излучения грубодисперсными частицами на длинах волн λ_1 , λ_2 и λ_3 имеют

нейтральный ход и равны α_3 , а коэффициенты ослабления субмикронными частицами на длинах волн λ_1 , λ_2 равны α_1 и α_2 соответственно. Тогда коэффициенты аэрозольного ослабления на длинах волн λ_1 и λ_2 будут равны $\alpha_1 + \alpha_3$ и $\alpha_2 + \alpha_3$, а разность между ними равна $\alpha_1 - \alpha_2$. При изменении концентрации субмикронных частиц в N раз, а грубодисперсных в M раз коэффициенты аэрозольного ослабления на длинах волн λ_1 и λ_2 будут равны $\alpha_1 N + \alpha_3 M$ и $\alpha_2 N + \alpha_3 M$, а разность между ними равна $N(\alpha_1 - \alpha_2)$.

Таким образом, разность между двумя коэффициентами аэрозольного ослабления в видимой области спектра пропорциональна концентрации субмикронного аэрозоля и не зависит от концентрации грубодисперсного аэрозоля. Фактически же эта разность зависит как от вида нормированной функции распределения субмикронных и грубодисперсных частиц по размерам, так и от их концентрации. Поэтому таким методом можно скомпенсировать только те вариации коэффициентов ослабления, обусловленные изменением концентрации субмикронного аэрозоля, которые превышают вариации, связанные с изменением вида нормированной функции распределения частиц по размерам.

3. Двухпараметрическая модель аэрозольного ослабления

Практически метод исключения ослабления субмикронными частицами основан на использовании значений $\alpha(\lambda)$ на двух длинах волн в видимой области спектра. Первая двухпараметрическая модель для расчета $\alpha(\lambda)$ в области спектра 10,6 мкм представлена в [7]. Для расчета коэффициентов аэрозольного ослабления в области спектра $\lambda = 0,4-12$ мкм в [8] предложена формула

$$\alpha(\lambda) = \alpha_{с.м.}(0,69) \left(\frac{\lambda}{0,69} \right)^{-n} + \alpha_{г.д.}(0,69) \frac{K(\lambda)}{K(0,69)}, \quad (2)$$

где

$\alpha_{с.м.}(0,69) = 0,67\alpha(0,48) - 0,26\alpha(0,69) - 0,023$;
 $\alpha_{г.д.}(0,69) = 1,26\alpha(0,69) - 0,67\alpha(0,48) + 0,023$ – коэффициенты ослабления субмикронной и грубодисперсной фракциями аэрозольных частиц на длине волны 0,69 мкм; $\alpha(0,48)$, $\alpha(0,69)$ – значения коэффициентов аэрозольного ослабления на длинах волн 0,48 и 0,69 мкм; $K(\lambda)$, $K(0,69)$ – коэффициенты, представляющие собой относительный спектральный ход коэффициента ослабления грубодисперсной фракции аэрозольных частиц; $n = -\ln \{ [\alpha(0,48) - K(0,48)/K(0,69)\alpha_{г.д.}(0,69)] / [\alpha(0,69) - \alpha_{г.д.}(0,69)] \} / \ln(0,48/0,69)$.

Двухпараметрическая модель для атмосферных дымок удовлетворительно описывает экспериментальные данные для разных климатических зон и расчетные модели аэрозольного ослабления в области спектра 0,4–12 мкм. На рис. 2 приведено сравнение модели (2) с экспериментальными данными для Центральной России [10], Западной Сибири [11], аридной зоны Казахстана [12] и расчетными данными для среднециклической модели [13], полученной на основе привлечения статистически обеспеченных данных о микрофизических параметрах атмосферного аэрозоля. Из рисунка видно, что разность ($\Delta\alpha$) между экспериментальными (расчетными) данными и расчетами коэффициентов аэрозольного ослабления по двухпараметрической модели не превышает 0,01–0,03 км⁻¹.

Первый член в (2) описывает спектральный ход коэффициента ослабления субмикронной фракции аэрозольных

частиц по формуле Ангрстрема с показателем степени n . Второй член в (2) описывает спектральный ход коэффициента ослабления грубодисперсной фракции аэрозольных частиц.

Для его расчета можно взять значение $K(\lambda) = 1$ или использовать данные [9], приведенные для области спектра 0,3–15 мкм и относительных влажностей воздуха от 10 до 99%.

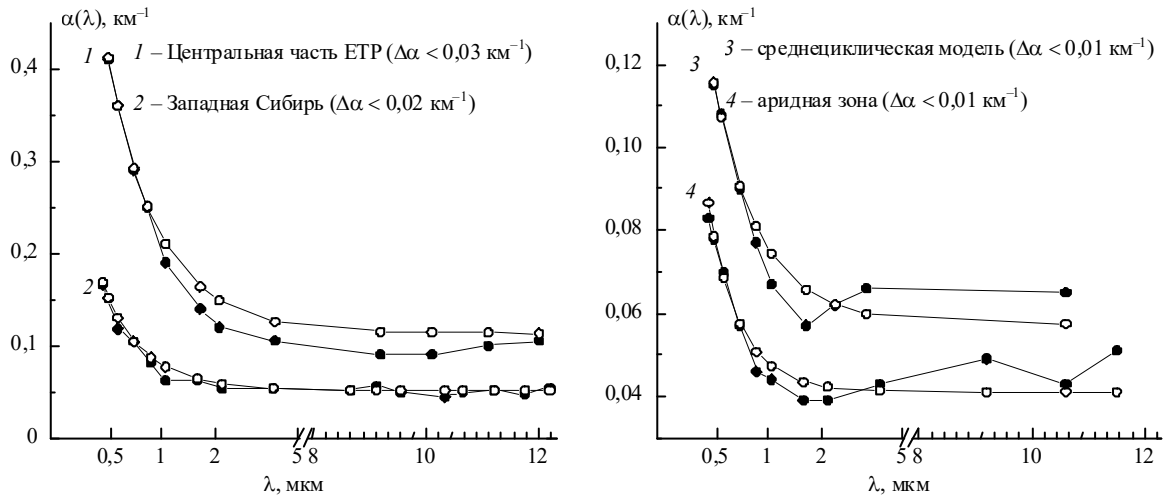


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных (темные кружки) коэффициентов аэрозольного ослабления излучения в области спектра 0,44–12 мкм с двухпараметрической моделью (2) (светлые)

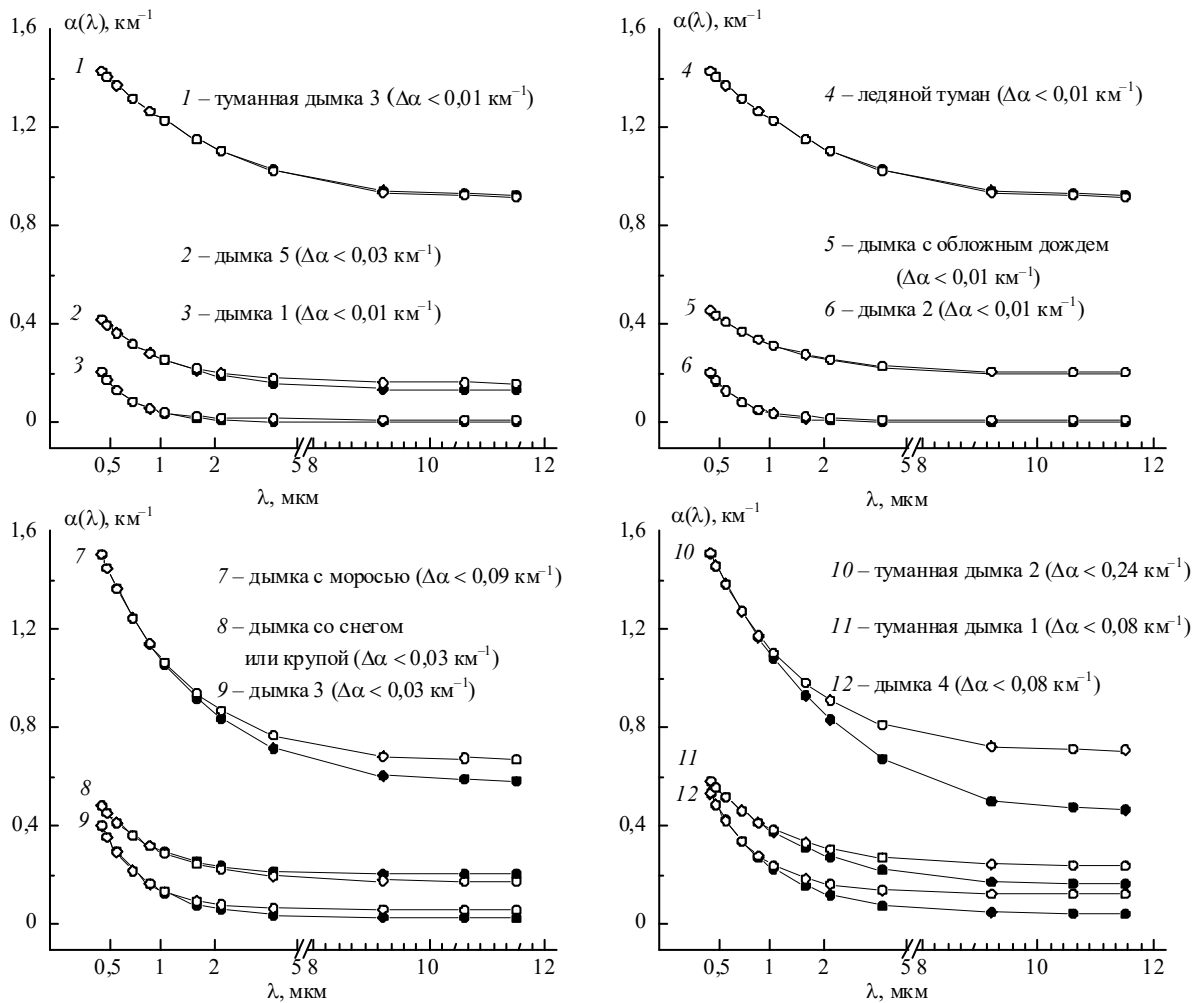


Рис. 3. Сравнение коэффициентов аэрозольного ослабления излучения в области спектра 0,44–12 мкм, рассчитанных по 12 однопараметрическим моделям (1) (темные кружки) и по двухпараметрической модели (2) (светлые)

На рис. 3 приведены результаты сравнения коэффициентов аэрозольного ослабления в области спектра 0,4–12 мкм, рассчитанных по двухпараметрической модели (2) и 12 однопараметрическим моделям (1), при их средних значениях метеорологической дальности видимости. Для восьми моделей (дымка 1, дымка 2, дымка 3, дымка 5, туманная дымка 3, дымка с обложным дождем, дымка со снегом и крупной и ледяной туман) разность между рассчитанными коэффициентами аэрозольного ослабления не превышает 0,01–0,03 км⁻¹. Для трех моделей (дымка 4, туманная дымка 1 и дымка с моросью) отличие составляет 0,08–0,09 км⁻¹ (67, 31 и 15%). Для модели туманной дымки 2 разница между рассчитанными коэффициентами оказалась максимальной и составила 0,24 км⁻¹ (34%). В области спектра 0,4–1,06 мкм рассчитанные значения коэффициентов аэрозольного ослабления по 12 моделям (1) и модели (2) отличаются не более чем на 0,02 км⁻¹.

4. Заключение

Таким образом, двухпараметрическая модель для атмосферных дымок удовлетворительно описывает экспериментальные и расчетные модели аэрозольного ослабления для разных климатических зон и большинства типов оптической погоды (дымки, туманные дымки, дымка с моросью, дымка с обложным дождем, дымка со снегом или крупной, ледяной туман). В дальнейшем предполагается разработка модели для любой пары и любого набора входных параметров в видимой области спектра.

Идею использования нескольких значений оптических параметров в видимой области спектра планируется применить при построении аэрозольных моделей для вертикальных атмосферных трасс. Необходимость построения таких моделей связана с тем, что на сети озонметрических станций России измеряется спектральная прозрачность в области спектра 0,344–0,627 мкм. Имея такие модели, можно дополнить экспериментальные данные модельными расчетами аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 0,7–12 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 97-05-65994).

N.N. Shchelkanov, Yu.A. Pkhalagov. Two-parameter Model of Aerosol Attenuation for Atmospheric Hazes.

An empirical model for computation of aerosol attenuation in ground hazes within spectral range of 0.4–12 μm from values of attenuation coefficients measured at two wavelengths of the Visible is proposed. The capabilities of the model use under different meteorological conditions are analyzed. The model is shown to describe satisfactorily the experimental and calculated models of aerosol attenuation for various climatic zones and most types of optical weather (haze, fog haze, drizzling fog, steady rain haze, show haze, and ice fog).

1. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 256 с.
2. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
3. Пхалагов Ю.А. Аэрозольное ослабление видимой и инфракрасной радиации в приземном слое атмосферы для характерных климатических районов: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО РАН, 1994. 334 с.
4. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. Построение региональных полуэмпирических моделей оптических характеристик атмосферы // Доклады АН СССР. 1982. Т. 265. № 6. С. 1353–1356.
5. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А. К вопросу о разработке двухпараметрических аэрозольных моделей атмосферной дымки // IX Всесоюзный симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск, 1987.
6. Щелканов Н.Н. Исследование ослабления оптического излучения аэрозолем и водяным паром в атмосфере аридной зоны: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО РАН, 1997. 156 с.
7. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А. К вопросу о разработке двухпараметрических аэрозольных моделей атмосферной дымки // XII Межреспубликанский симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере и водных средах: Тезисы докл. Томск: Изд. ТНЦ СО РАН, 1993. С. 40.
8. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А. Двухпараметрическая модель спектрального хода коэффициентов аэрозольного ослабления для атмосферных дымок // V Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск: Изд. ИОА СО РАН, 1997. С. 140–141.
9. Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей в инфракрасной области спектра: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. СПб.: СПбГУ, НИИФ, 1995. 338 с.
10. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. Статистические характеристики ослабления видимой и ИК-радиации в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1979. Т. 15. № 3. С. 257–265.
11. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Аэрозольное ослабление оптического излучения в летних дымках Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 6. С. 720–726.
12. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Аэрозольное ослабление оптического излучения в атмосфере аридной зоны // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 10. С. 1318–1329.
13. Креков Г.М., Звенигородский С.Г. Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск: Наука, 1990. 278 с.