

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.521.3

И.М. Насртдинов, Т.Б. Журавлева, С.М. Сакерин

**Яркость безоблачного неба вблизи горизонта:
малопараметрические модели и сравнение с экспериментом**

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 27.04.2006 г.

Представлены малопараметрические описания распределения полей яркости вблизи горизонта, основанные на модельных расчетах, для аэрозольно-газовой сферической атмосферы. Проводится сопоставление результатов численного моделирования с экспериментальными данными. Предложен новый метод определения аэрозольной оптической толщи (АОТ) по данным измерений яркости неба в области горизонта. Достоинством данного метода является то, что он не требует абсолютной калибровки прибора — АОТ восстанавливается по относительным измерениям углового положения максимума яркости неба.

Введение

Для решения ряда прямых и обратных задач оптики атмосферы часто необходимо знать распределение яркости по небосводу. Большой цикл теоретических и экспериментальных исследований яркости дневного неба был выполнен в Астрофизическом институте г. Алматы (см., например, [1]). Были выявлены основные закономерности и факторы, определяющие распределение яркости по небосводу. Установлено, что яркость неба в различных его участках может различаться от 5 до 2000 раз в зависимости от спектрального диапазона и положения Солнца. Но в этих работах недостаточно полно описана яркость неба для зенитных углов наблюдений \sim более 80° .

Описание поля яркости неба на основе экспериментальных исследований затруднено из-за необходимости проведения продолжительных наблюдений в условиях большого многообразия атмосферных ситуаций. В последнее время для этой цели широко используются методы численного моделирования [2–7], которые позволяют с удовлетворительной точностью решать уравнение переноса излучения в рассеивающих и поглощающих средах. Большинство разработанных алгоритмов были реализованы в предположении плоскопараллельной модели атмосферы и нашли применение в методах определения оптических характеристик аэрозоля, например восстановления альbedo однократного рассеяния (АОР), отнесенных ко всему столбу атмосферы [8–10]. Одним из ограничений для таких методов является то, что они не приемлемы для зенитных углов Солнца и/или наблюдения \sim более 80° [6, 7]. Для больших зенитных углов были разработаны алгоритмы расчета для сферической модели атмосферы [5–7], один из которых был модифицирован [11, 12] и использован для наших исследований. С помощью реализованного авторами алгоритма была создана числен-

ная модель поля яркости неба и выявлены основные закономерности формирования его угловой структуры в пригоризонтной зоне небосвода [13].

Для решения уравнения переноса излучения методами численного моделирования необходимо знание большого числа входных параметров, которые не всегда могут быть доступны (например, высотные профили аэрозольных характеристик). В связи с этим для задач, не требующих высокой точности, целесообразна разработка малопараметрических моделей (МПМ) полей рассеянного излучения. Наиболее известной моделью является аналитическое описание распределения яркости по небосводу, предложенное В.В. Соболевым [14]. Данная формула имеет удовлетворительную точность для большого диапазона входных параметров, но при зенитных углах больше 80° становится практически не приемлемой. В [15] предложены другие МПМ, которые более детально учитывают зенитно-азимутальный ход яркости неба, но тоже не применимы в области горизонта.

В данной статье представлены малопараметрические модели угловых зависимостей яркости для пригоризонтной области неба и приводятся оценки их точности. На основе одной из формул предложен новый метод определения аэрозольной оптической толщи τ_{aer} (АОТ) атмосферы по угловому положению максимума яркости неба над горизонтом. Для проверки проведенных радиационных расчетов и разработанного метода проводится сопоставление численных расчетов с результатами натурных измерений.

1. Сравнение результатов численного и натурального экспериментов

В [11] проводится сравнение результатов наших расчетов с результатами других авторов и показано их хорошее согласие друг с другом. Для проверки адекватности алгоритма и выявленных закономерностей [13] следующим шагом исследований является

сопоставление модельных расчетов с данными натурального эксперимента. Напомним, что выбранный нами подход численного моделирования основывается на использовании метода Монте-Карло и «рядов экспонент» [12]. Алгоритм позволяет учитывать вертикальную неоднородность и сферичность атмосферы [11], аэрозольно-молекулярное рассеяние и поглощение, отражение от подстилающей поверхности и реальные аппаратные функции фотометров.

1.1. Характеристика аппаратуры и условий эксперимента

Летом 2003–2005 гг. были проведены экспериментальные исследования угловых распределений диффузной радиации безоблачного неба. Измерения осуществлялись в лесной зоне (полигон «Фоновый» ИОА СО РАН) на удалении 60 км от г. Томска и включали в себя три типа экспериментов: 1) исследование азимутального распределения яркости неба в альмукантарате Солнца; 2) то же в области горизонта; 3) исследование яркости неба в зависимости от зенитного угла наблюдения.

Яркость неба измерялась сканирующим фотометром, разработанным на основе стандартного фотообъектива МТО-1000 и двухкоординатного поворотного устройства. Выделение отдельных спектральных участков осуществлялось интерференционными фильтрами, установленными в непрерывно вращающемся барабане. Краткие технические характеристики сканирующего фотометра приведены ниже. Указанные эксперименты сопровождались измерениями АОТ атмосферы в диапазоне 0,37–1,06 мкм с помощью солнечного фотометра. Методика расчета АОТ по сигналам солнечного фотометра описана в [1, 16].

Угол поля зрения фотометра Ω , град	0,25
Максимумы полос пропускания фильтров λ , мкм	0,44; 0,5; 0,63; 0,87; 1,06
Диапазон углов сканирования, град:	
по азимуту φ	0–360
по зенитному углу ξ	50–97
Время единичного цикла измерений, мин:	
по азимуту	3
по зенитному углу	0,7

Аппаратура располагалась на специально оборудованной вышке высотой 18 м над уровнем земли. В районе измерений высота леса была 17–25 м, поэтому в некоторых азимутах измерения можно было проводить лишь до зенитных углов 88°.

Для определения абсолютных значений яркости неба проводилась калибровка фотометра на основе дополнительных измерений яркости диффузного (ортотропного) экрана B_s , ориентированного перпендикулярно падающей прямой радиации [1, 17]. В этом случае для регистрируемых световых потоков от неба $\Phi(\mu)$ и экрана Φ_s можно записать:

$$\Phi(\mu) = B(\mu)\Omega A_{\text{вх}}, \quad (1)$$

$$\Phi_s = B_s\Omega A_{\text{вх}} = \frac{R}{\pi} I_{\perp} \Omega A_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где $I_{\perp} = I_0 T^{atm}$ – освещенность прямой радиацией перпендикулярной площадки; Ω – угол поля зрения фотометра; I_0 – внеатмосферная солнечная постоянная; R – коэффициент отражения экрана; T^{atm} – прозрачность атмосферы; $A_{\text{вх}}$ – площадь приемной системы фотометра; μ – косинус угла рассеяния θ , однозначно связанный с геометрическими параметрами эксперимента:

$$\mu = \sin\xi \sin\xi_0 \cos\varphi + \cos\xi \cos\xi_0, \quad (3)$$

ξ_0 – зенитный угол Солнца; φ – азимутальный угол относительно Солнца. Из (1) и (2) получаем формулу для яркости неба:

$$B(\mu) = \frac{\Phi(\mu)R}{\Phi_s\pi} I_{\perp}. \quad (4)$$

В дальнейшем экспериментальные зависимости $B(\mu)$ сопоставлялись с результатами численных расчетов с учетом измеренных значений АОТ и модельно заданных других характеристик. Индикатриса аэрозольного рассеяния $g_{aer}(\theta)$, альbedo однократного рассеяния аэрозоля Λ_{aer} и их спектральный ход, используемые в расчетах, задавались в соответствии со стандартной моделью WCP [18] для континентального аэрозоля и лета умеренных широт. Альbedo подстилающей поверхности (A_s) было принято равным 0,15. Коэффициенты молекулярного поглощения рассчитывались по спектроскопической базе данных HITRAN-2000 на основе модели AFGL [19] для лета умеренных широт.

1.2. Результаты сопоставления экспериментальных и рассчитанных угловых распределений яркости неба

Рассмотрим сначала зависимость диффузной радиации от зенитного угла наблюдения. Ранее было показано [13], что яркость неба может иметь немонотонную зависимость от зенитного угла с максимумом в области углов $\xi = 80 \div 90^\circ$. На рис. 1 иллюстрируется характер трансформации угловых распределений яркости неба при изменении τ_{aer} , а на рис. 2 – примеры сравнения модельных расчетов с экспериментальными зависимостями.

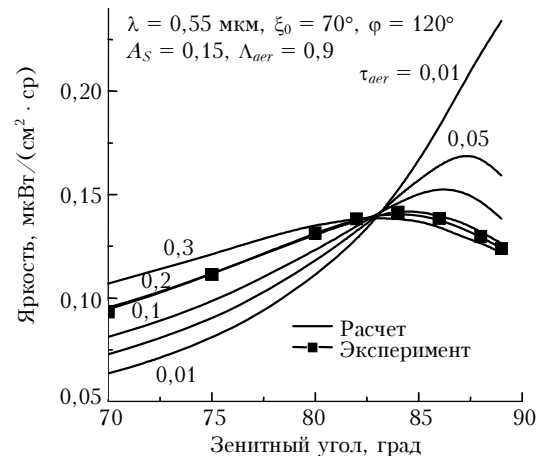


Рис. 1. Трансформация углового распределения яркости неба при изменении АОТ атмосферы

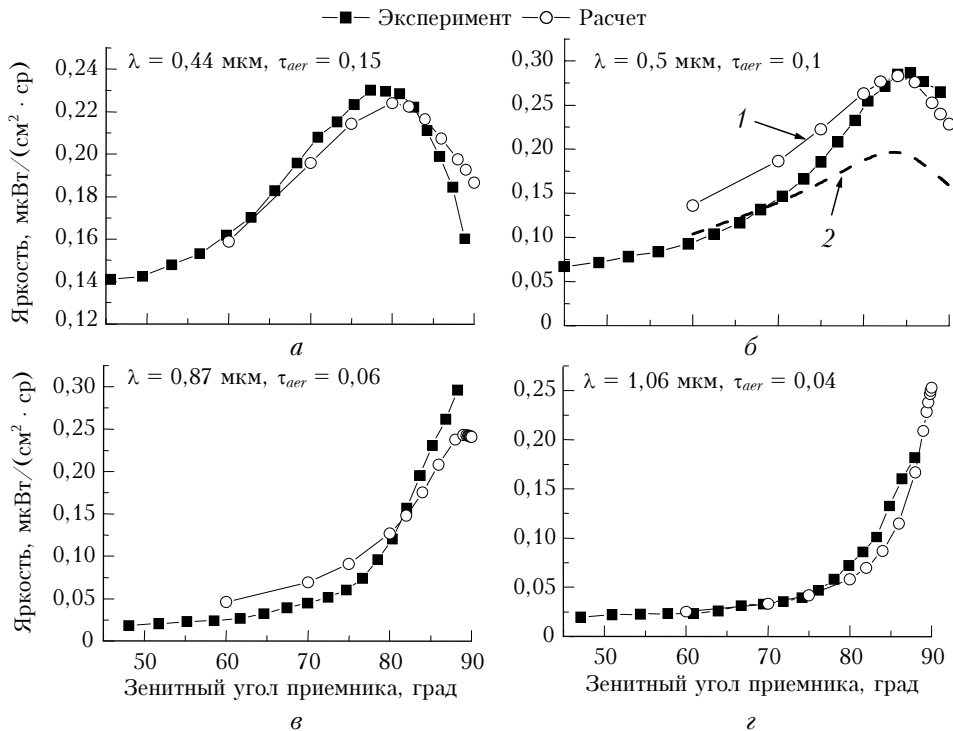


Рис. 2. Яркость неба в зависимости от зенитного угла наблюдения: сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования ($\varphi = 150^\circ$)

Модельные расчеты и экспериментальная проверка показали, что положение максимума яркости зависит от общей оптической толщи атмосферы τ :

$$\tau = \tau_{aer} + \tau_R,$$

где τ_R — оптическая толщина молекулярного рассеяния. В качестве примера на рис. 2, б приведено сравнение $B(\xi)$, рассчитанных для разных длин волн: кривая 1 — $\tau_{aer} = 0,1, \tau_R = 0,146, \tau = 0,246$ ($\lambda = 0,5 \text{ мкм}$); кривая 2 — $\tau_{aer} = 0,23, \tau_R = 0,015, \tau = 0,245$ ($\lambda = 0,87 \text{ мкм}$). Из рис. 2, б видно, что при равных значениях τ угловое положение максимума яркости одинаковое. Сопоставление на этих и других примерах качественно показало удовлетворительное согласие результатов численного и натурального экспериментов. Различия, как правило, не превышают 20% и обусловлены неточностью задания модельных значений АОР аэрозоля, альбедо подстилающей поверхности и индикатрисы аэрозольного рассеяния.

Сравнение азимутальных распределений яркости неба на горизонте $B(\varphi)$ показало (рис. 3), что в большинстве ситуаций результаты хорошо согласуются. Однако в некоторых случаях различия с численными расчетами могут достигать 25% (рис. 3, б). Эти различия в первую очередь связаны с неточностью задания модельной индикатрисы аэрозольного рассеяния, вытянутость которой оказывает основное влияние на азимутальную зависимость $B(\varphi)$. В примере, приведенном на рис. 3, б, в расчетах использовалась индикатриса с фактором асимметрии $G^A = 8,3$

$$(G^A = \frac{\int_0^{\pi/2} g_{aer}(\mu) d\mu}{\int_{\pi/2}^{\pi} g_{aer}(\mu) d\mu}).$$

При задании дру-

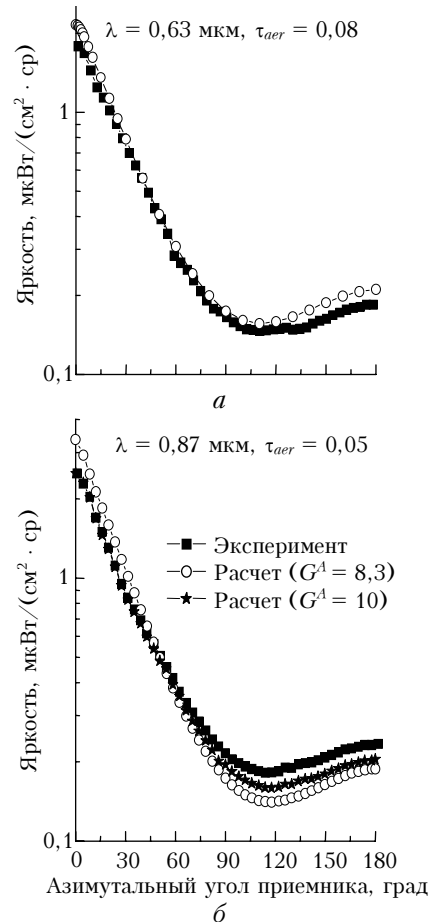


Рис. 3. Азимутальная яркость неба: сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования

гой индикатрисы рассеяния ($G^A = 10$) расхождения уменьшаются до 10%. Может сложиться впечатление, что асимметрия яркости убывает с ростом G^A . Дело в том, что используемые индикатрисы имеют разную угловую структуру. У индикатрисы с фактором асимметрии 8,3 завышена задняя полусфера, а у $G^A = 10$ завышена ореольная часть, которых на графике не видно, поскольку они не могут реализоваться при заданной геометрии.

В целом результаты экспериментальной проверки показали, что разработанный алгоритм численных расчетов правильно отражает реальные закономерности углового распределения диффузной радиации при больших зенитных углах наблюдений и может использоваться для моделирования переноса излучения в атмосфере.

2. Малопараметрические представления угловых распределений яркости неба

На основе выявленных закономерностей и факторов, влияющих на распределения яркости в области горизонта [13], были построены малопараметрические модели, описывающие азимутальную зависимость яркости неба вне солнечного ореола, а также положение и величину максимума яркости над линией горизонта. Коэффициенты в аппроксимационных формулах азимутальной зависимости яркости неба и ее многократной компоненты получены для спектрального интервала 0,55 мкм.

2.1. Модель яркости неба на горизонте (азимутальная зависимость)

Расчеты показали, что коридор возможных значений яркости $B_H(\varphi)$ составляет несколько десятков процентов, если оптические характеристики варьируют практически в полном диапазоне своей реальной изменчивости: τ_{aer} от 0,05 до 0,4; Λ_{aer} от 0,8 до 1; вытянутость индикатрисы $g_{aer}(\theta)$ от 5 до 10; альbedo подстилающей поверхности от 0 до 0,7. Основное влияние на азимутальную зависимость яркости неба, особенно в передней полусфере, оказывает аэрозольная индикатриса рассеяния, вытянутость которой определяется фактором асимметрии G^A или средним косинусом $\bar{\mu}$. Поэтому для описания угловой структуры $B_H(\theta)$ мы предлагаем использовать индикатрису Хеньи–Гринштейна $g_{HG}(\theta)$ со средним косинусом, соответствующим $g_{aer}(\theta)$. Другими параметрами, влияющими на $B_H(\theta)$, являются аэрозольная оптическая толщина атмосферы и оптическая масса t в направлении на Солнце. Относительно слабая чувствительность $B_H(\theta)$ к изменению остальных характеристик позволила использовать при построении МПМ их средние модельные значения. Для удобства представления угловой зависимости яркости неба задается в виде функции от μ :

$$B_H(\mu) = I_0 g_{HG}(\mu)(a + b\mu)(c + d\mu^2); \quad (5)$$

$$a = 0,09 + 1,51e^{-m/3} + 1,25 \exp[-12(1 - 0,1m + 0,009m^2)\tau];$$

$$b = 0,077 + 0,91e^{-m/3,85} + (1,36 + 6,42e^{-m/2,6}) \times \exp[-(23,3 - 2,7m + 0,17m^2)\tau];$$

$$c = 0,55 + \tau; \quad d = 0,85 - 2\tau;$$

$$g_{HG}(\mu) = 0,5(1 - \bar{\mu}^2)(1 - 2\mu\bar{\mu} + \bar{\mu}^2)^{-1,5},$$

$$\bar{\mu} = \int_{-1}^1 g_{aer}(\mu) \mu d\mu.$$

Числовые параметры рассчитаны для средних (модельных) значений $\Lambda_{aer} = 0,9$ и $A_S = 0,15$. Перевод $B_H(\mu)$ в зависимость от азимутального угла φ осуществляется на основе соотношения (3):

$$\varphi = \arccos[(\mu - \cos\xi \cos\xi_0)/\sin\xi \sin\xi_0].$$

По данным сети AERONET [20], за последние четыре года (2002–2005) в г. Томске в 90% случаев альbedo однократного рассеяния изменялось от 0,85 до 0,99; средний косинус от 0,6 до 0,68. Диапазон изменения АОТ атмосферы составил 0,05–0,25 [21]. Для индикатрисы Хеньи–Гринштейна изменение среднего косинуса от 0,6 до 0,68 соответствует диапазону фактора асимметрии G^A 6,5–10.

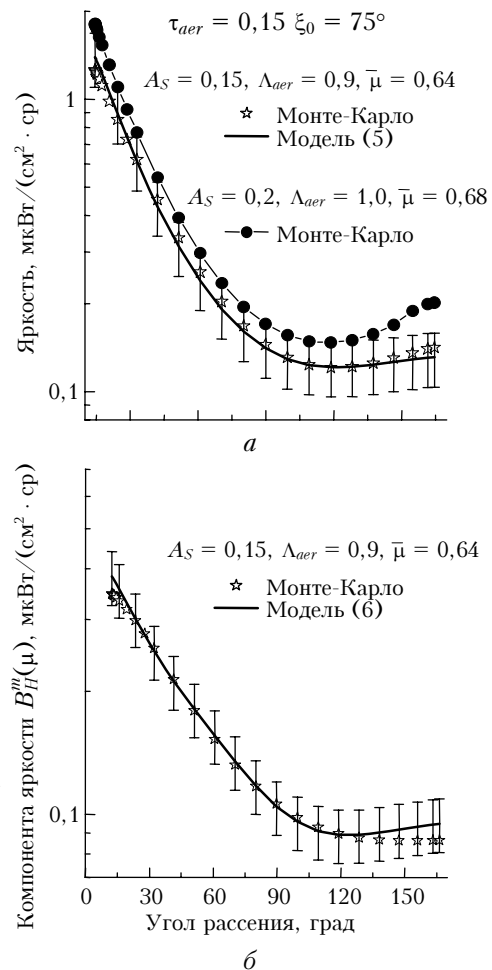


Рис. 4. Сравнение расчетов: а – азимутальной зависимости яркости неба $B_H(\mu)$ с моделью (5) и б – многократной компоненты яркости $B_H^m(\mu)$ с моделью (6)

Для оценки погрешности модели (5) были проведены численные расчеты яркости методом Монте-Карло и сопоставлены с рассчитанными значениями по формуле (5). При точном задании входных параметров ($\bar{\mu} = 0,64$; $\Lambda_{aer} = 0,9$; $A_S = 0,15$; $\tau_{aer} = 0,15$; $\xi_0 = 75^\circ$) погрешность (5) составляет менее 10%. Поскольку в природе могут реализовываться различные $\bar{\mu}$, Λ_{aer} , A_S , а модель (5) получена для их средних значений, то необходимо оценить чувствительность (5) к неточности задания данных параметров. Для этого были проведены численные расчеты распределений яркости $B_H(\mu)$ для различных аэрозольных индикатрис $g_{aer}(\mu)$ ($G^A = 6,5 \div 10$ или $\bar{\mu} = 0,6 \div 0,68$), АОР аэрозоля (0,85–1,0) и A_S (0,1–0,2). Результаты сопоставления показали (рис. 4, а), что погрешность разработанной модели не превышает 20% (вертикальные отрезки). В некоторых случаях она может достигать 35%. На рис. 4, а приведен пример такой реализации для $A_S = 0,2$, $\Lambda_{aer} = 1,0$, $\tau_{aer} = 0,15$, $\bar{\mu} = 0,68$, $\xi_0 = 75^\circ$ (кружки).

2.2. Параметризация компоненты яркости неба, обусловленной многократным рассеянием $B_H^m(\mu)$ для случая консервативного рассеяния

Закономерность углового хода $B_H^m(\mu)$ можно аппроксимировать с помощью атмосферной индикатрисы рассеяния, представляющей собой взвешенную сумму индикатрисы молекулярного рассеяния и индикатрисы Хеньи–Гринстейна. Более детальный учет угловой зависимости осуществляется введением дополнительного множителя, который представляет собой полином третьей степени от μ :

$$B_H^m(\mu) = I_0 g(\mu) (a + b\mu + c\mu^2 + d\mu^3), \quad (6)$$

где параметры a, b, c, d выражаются элементарными функциями от τ_{aer} и m :

$$a = 0,038 + 0,06\tau_{aer} + (0,174 + 2,057\tau_{aer}) \times \exp[-(0,115 + 0,458\tau_{aer})m],$$

$$b = 0,072 - 0,437\tau_{aer} - (0,005 - 0,02\tau_{aer})m;$$

$$c = -[0,025 + 0,012\tau_{aer} + (0,094 + 1,058\tau_{aer}) \times \exp(-(0,122 + 0,448\tau_{aer})m)];$$

$$d = -\exp[-(1,29 + 3,097\tau_{aer} - (0,014 + 0,491\tau_{aer})m) \ln 10];$$

$$g(\mu) = \frac{g_{HG}(\mu)\tau_{aer} + g_R(\mu)\tau_R}{\tau_{aer} + \tau_R}, \quad g_R(\mu) = 0,375(1 + \mu^2).$$

Константы разложения (в параметрах a, b, c, d) рассчитаны для средних значений вытянутости $g_{aer}(\theta)$ и A_S . Аналогично предыдущему пункту были проведены сравнения модели (6) с численным расчетом. Погрешность аппроксимационной формулы (6) при

точном задании входных параметров также не превосходит 10% (рис. 4, б). Вариации атмосферных параметров в том же диапазоне (см. п. 2.1) приводят к погрешности в расчете компоненты $B_H^m(\mu)$ до 15%.

2.3. Параметризация максимума яркости неба, наблюдаемого вблизи горизонта

При анализе зенитных распределений яркости неба вне области солнечного ореола ($\theta > 20^\circ$) было выявлено наличие максимума яркости в пригоризонтной зоне ($\xi = 80 \div 90^\circ$), характеристики которого (положение ξ_{max} и величина B_{max}) зависят, прежде всего, от общей оптической толщи τ . Для заданной геометрии эксперимента (m, φ) и длины волны (или толщи молекулярного рассеяния) угол ξ_{max} хорошо аппроксимируется в виде линейной зависимости от τ :

для передней полусферы –

$$\xi_{max} = \min\{89,5 + 7e^{-\varphi/60} - (29,7 + 0,8m - 0,11\varphi)\tau; 90^\circ\}, \quad (7a)$$

для задней полусферы –

$$\xi_{max} = \min\{89,5 + 7e^{-\varphi/60} - (14,2 + 0,9m + 0,04\varphi)\tau; 90^\circ\}, \quad (7b)$$

азимутальный угол φ задается в градусах. Из формулы видно, что положение ξ_{max} меняется в зависимости от азимута. Предельным угловым положением максимума яркости, которое реализуется в условиях высокой прозрачности атмосферы ($\tau < 0,05$), является направление на горизонт $\xi_{max} = 90^\circ$. Расчеты показали, что при вариациях других оптических характеристик (A_S от 0 до 0,3; $\Lambda_{aer} > 0,8$; G^A от 5 до 10) погрешность определения ξ_{max} по полученным формулам не превышает 1%.

Для параметризации самой величины яркости B_{max} можно использовать индикатрису Хеньи–Гринстейна $g_{HG}(\mu)$ и дополнительный входной параметр – приближенное значение АОР аэрозоля:

$$B_{max} = 1,3 [g_{HG}(\mu_{max}) \Lambda_{aer}]^2 e^{-\tau\sqrt{m}} [e^{-\varphi/46} + 6me^{-\varphi/12}], \quad (8)$$

где $\mu_{max} = \cos \xi_{max}$.

Сравнение формулы (8) с результатами численного моделирования показало, что погрешность предложенной аппроксимации составляет 20%.

3. Методика определения АОР

Выше уже отмечалось, что яркость неба в зависимости от зенитного угла наблюдения имеет максимум в пригоризонтной зоне, который практически полностью определяется величиной общей оптической толщи. Рассмотренный факт дал основание предложить новый метод определения АОР атмосферы по значению зенитного угла наблюдаемого максимума яркости (отличного от 90°).

Для оценки применимости метода были проведены численные расчеты взаимосвязи АОТ атмосферы с зенитным углом ξ_{\max} для разных азимутов наблюдения и модельных значений входных параметров (рис. 5).

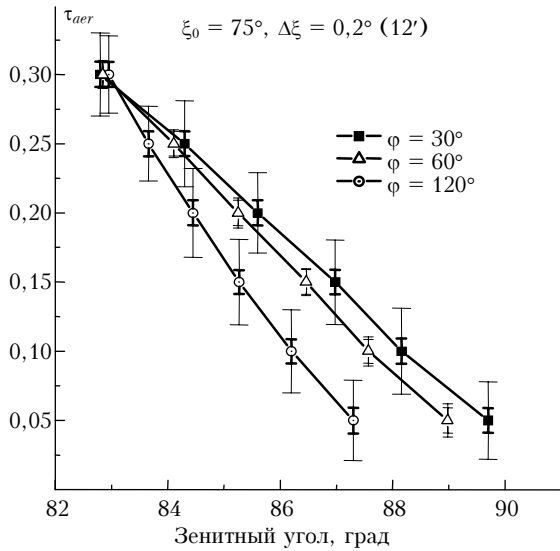


Рис. 5. Взаимосвязь АОТ атмосферы с зенитным углом, в котором наблюдался максимум яркости неба (ξ_{\max})

Вертикальными отрезками показаны оценки погрешности определения АОТ: а) внутренние отрезки — только из-за неточности определения углового положения максимума $\Delta\xi_{\max} = \pm 0,2^\circ$; б) внешние отрезки — при дополнительной погрешности, обусловленной вариациями оптических характеристик, значения которых задаются модельно (индикатрисы и альbedo однократного рассеяния аэрозоля, альbedo подстилающей поверхности A_S). Расчеты показали, что минимальная погрешность определения АОТ (величиной до $\pm 0,015$) реализуется в области углов рассеяния $\sim 60^\circ$, где пересекаются индикатрисы аэрозольного рассеяния. Это свойство аэрозольных индикатрис хорошо известно и часто используется в угловых методах «светорассеяния» для минимизации влияния вариаций индикатрис рассеяния (см., например, [17, 22]). Поэтому для минимизации погрешности определения АОТ целесообразно использовать исходную формулу (7а) для передней полусферы:

$$\tau_{aer} = \frac{89,5 + 7e^{-\phi/60} - \xi_{\max}}{29,7 + 0,8m - 0,11\phi} - \tau_R. \quad (9)$$

На основе результатов натурных измерений зенитных распределений яркости неба были проведены апробация разработанной методики и сравнение с данными стандартного метода [16] — измерений АОТ по прямой солнечной радиации (рис. 6).

Результаты сравнения показали хорошее согласие: стандартное отклонение данных, полученных двумя методами, составляет 0,013, коэффициент взаимной корреляции — 0,83.

Достоинство рассмотренного «углового» метода состоит в том, что он не требует абсолютной калиб-

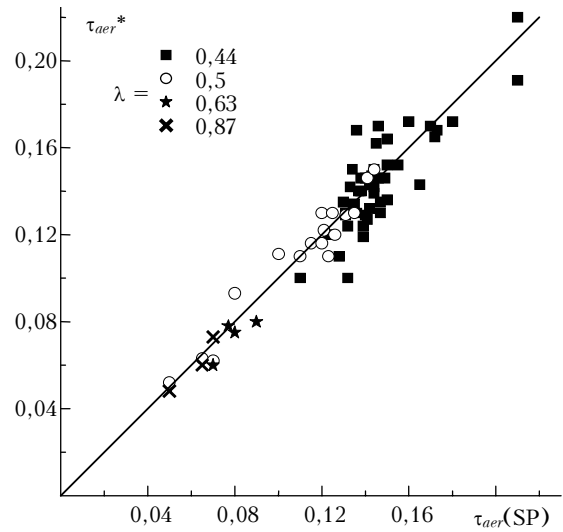


Рис. 6. Сопоставление результатов определения АОТ стандартным ($\tau_{aer}(SP)$) и «угловым» (τ_{aer}^*) методами

ровки — достаточно провести относительные измерения зенитного распределения яркости неба. Основная трудность реализации классического способа определения АОТ атмосферы («метод прозрачности») состоит в качественной калибровке фотометра, которая проводится в горных обсерваториях либо требует накопления продолжительных рядов наблюдений с последующим скрупулезным отбором «калибровочных» ситуаций. Разработанная методика не является альтернативой стандартному методу, но может найти применение для контроля и оперативной «калибровки» результатов, получаемых «методом прозрачности».

Одним из ограничений разработанного метода является невозможность его реализации в условиях высокой прозрачности атмосферы (при $\tau < 0,05$), когда угловое положение максимума яркости неба стягивается к горизонту.

Заключение

Результаты экспериментальных исследований подтвердили, что разработанный ранее алгоритм численного моделирования адекватно описывает наблюдаемые поля диффузной радиации безоблачного неба при больших зенитных углах наблюдения.

Построены малопараметрические модели, характеризующие угловое распределение яркости неба в пригоризонтной зоне. Экспериментальная проверка показала, что погрешность предложенных формул для большинства наблюдательных ситуаций не превосходит 15–20%. В области больших и малых углов рассеяния ($\theta < 30^\circ$ и $\theta > 150^\circ$) погрешность малопараметрического описания яркости неба может увеличиваться до 25–35%.

Предложен новый метод определения АОТ атмосферы по значению зенитного угла, в котором наблюдается максимум яркости неба над горизонтом. Экспериментальная проверка показала, что результаты «углового» метода хорошо согласуются с данными

независимых измерений АОТ атмосферы. Разработанный метод может найти применение для оперативной «калибровки» фотометров, измеряющих АОТ стандартным «методом прозрачности».

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-05-64410).

1. Глушко В.Н., Иванов А.И., Лившиц Г.Ш., Федюлин И.А. Рассеяния инфракрасного излучения в безоблачной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1974. 210 с.
2. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах / Под ред. Ж. Ленобль. Л.: Гидрометеопиздат, 1990. 262 с.
3. Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А. Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.
4. Султангазин У.М. Методы сферических гармоник и дискретных ординат в задачах кинетической теории переноса. Алма-Ата: Наука, 1979. 268 с.
5. Сушкевич Т.А. О моделировании переноса солнечного излучения в сферической атмосфере Земли и облаках // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 12. № 3. С. 251–257.
6. Назаралиев М.А. Статистическое моделирование радиационных процессов в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1990. 226 с.
7. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
8. Dubovik O.T., King M. A flexible inversion algorithm for retrieval aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105. N 16. P. 20673–20696.
9. Nakajima T., Tonna G., Rao R., Boi P., Kaufman Y., Holben B. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions // Appl. Opt. 1996. V. 35. N 15. P. 2672–2686.
10. Wang M., Gordon R. Retrieval of the columnar aerosol phase function and single-scattering albedo from sky radiance over the ocean: simulations // Appl. Opt. 1993. V. 32. N 24. P. 4598–4609.
11. Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Сакерин С.М. Численное моделирование угловой структуры яркости неба вблизи горизонта при наблюдении с Земли. Часть 1. Аэрозольная атмосфера // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 537–546.
12. Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М., Сакерин С.М., Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю. Численное моделирование угловой структуры яркости неба вблизи горизонта при наблюдении с Земли. Часть 2. Аэрозольно-газовая атмосфера // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 12. С. 1065–1074.
13. Сакерин С.М., Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М. Численное моделирование угловой структуры яркости неба вблизи горизонта при наблюдении с Земли. Часть 3. Закономерности углового распределения // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 3. С. 242–251.
14. Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет. М.: Наука, 1972. 335 с.
15. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеопиздат, 1997. 334 с.
16. Гуцин Г.П. Методы, приборы и результаты измерений спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеопиздат, 1988. 200 с.
17. Пясковская-Фесенкова Е.В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 219 с.
18. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation: World Climate Research Programme. WCP-112, WMO/TD N 24. 1986. 60 p.
19. Anderson G., Clough S., Kneizys F., Chetwynd J., Shettle E. 1986: AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km), Air Force Geophysics Laboratory. AFGL-TR-86-0110, Environ. Res. Paper N 954.
20. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
21. Sakerin S.M., Kabanov D.M. Spectral dependences of the atmospheric aerosol optical depth in the extended spectral region of 0,4–4 mkm // Proc. 16-th ARM Science Team Meeting. March 27–31, 2006, Albuquerque, NM. http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf16/extended_abs/sakerin_sm.pdf
22. Павлов В.Е., Шестухин А.С. Яркость неба в области нефелометрических углов рассеяния в аридных зонах земного шара // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 423–425.

I.M. Nasrtdinov, T.B. Zhuravleva, S.M. Sakerin. Brightness of the cloudless sky near horizon: few-parametric models and comparison with experiment.

Few-parameter descriptions of distribution of the near-horizon brightness fields based on the model calculations for the aerosol-plus-gas atmosphere are presented. The results of numerical simulation are compared with experimental data. A new method is proposed for determination of the aerosol optical thickness (AOT) from the data on the near-horizon sky brightness. The advantage of this method is that it does not require absolute calibration of the device – AOT is retrieved from relative measurements of the angular position of the maximum of sky brightness.