

М.А. Свириденков¹, П.П. Аникин¹, Т.Б. Журавлева², И.М. Насртдинов²

Параметризация отношения потоков рассеянного и прямого солнечного излучения и ее использование для оценок альбедо однократного рассеяния с помощью приборов типа MFRSR

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

²Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 24.12.2007 г.

Предложена аналитическая параметризация отношения потоков рассеянного и прямого солнечного излучения. Проанализирована возможность коррекции данных измерений потоков рассеянного излучения радиометрами типа MFRSR. Проведено сопоставление расчетов с использованием предложенной параметризации с результатами натуральных наблюдений.

Введение

Альбедо однократного рассеяния атмосферного аэрозоля A_a является важной характеристикой, от которой зависит не только уровень, но и знак аэрозольного радиационного форсинга [1]. Для определения A_a в столбе атмосферы по данным измерений спектральной прозрачности и яркости дневного безоблачного неба используются различные методы, в том числе и косвенные, включающие решение обратных задач и последующий расчет ослабления и рассеяния для восстановленных распределений частиц по размерам и значений действительной и мнимой частей показателя преломления [2].

В работах [3–5] обоснованы полуэмпирические методы оценки аэрозольной оптической толщины рассеяния непосредственно из наблюдаемой угловой зависимости яркости неба в солнечном альмукантарате. В [6, 7] предложен итерационный подход к восстановлению индикатрисы рассеяния света по данным измерений яркости неба в солнечном альмукантарате и в плоскости солнечного вертикала и последующим расчетом альбедо однократного рассеяния с привлечением информации об оптической толщине аэрозоля. Для использования как косвенных, так и прямых методов восстановления A_a необходимы измерения яркости неба в абсолютных единицах (в энергетических или в sr^{-1}). Кроме того, подходы [3–5] базируются на модельных расчетах для небольшого числа распределений частиц по размерам, а решение обратных задач связано с трудностями, обусловленными самой спецификой некорректных задач.

Для определения мнимой части показателя преломления и альбедо подстилающей поверхности A_s в работах [8, 9] было предложено использовать данные о зависимости отношения G измеренных потоков рассеянного и прямого излучения от зенитного угла

Солнца θ . Важным достоинством этого подхода, получившего название Diffuse/Direct (D/D)-метода, является то, что при условии измерения обоих потоков одним и тем же приемником отпадает необходимость в калибровке последнего. Однако задача оценки показателя поглощения по отношению потоков является, на наш взгляд, слишком недоопределенной, и дальнейшего развития работы в этом направлении не получили. В то же время для выявления климатических эффектов аэрозоля важны не оптические константы вещества, а непосредственно влияющее на поток рассеянной радиации альбедо однократного рассеяния: в силу этого более перспективно использовать D/D -метод для оценки именно A_a .

Измеряемое отношение является функцией многих параметров, поэтому для практического применения D/D -метода, безусловно, полезным является подбор аналитической параметризации G . Кроме того, использование такой параметризации упрощает анализ влияния различных факторов на величину G , а также на восстановленные на ее основе значения альбедо однократного рассеяния.

В настоящей статье предлагается аналитическая аппроксимация отношения потоков рассеянного и прямого (нормального к приемной площадке) солнечного излучения, применимая в широком диапазоне изменчивости входных параметров. Поскольку существующие в настоящее время широкоугольные приемники излучения обладают отличной от ламбертовской угловой характеристикой, для применения D/D -метода необходим корректный учет неидеальности косинусной характеристики приемника.

Здесь анализ возможности корректной корректировки результатов измерений рассеянной радиации выполнен на примере спектро радиометра с вращающимся теневым экраном MFR-7 (Multi-Filter Radiometer). В качестве иллюстрации проведено сопоставление

отношения G , полученного на основе натуральных измерений и результатов численного моделирования, а также восстановленных по D/D -методу значений альbedo однократного рассеяния с данными обработки параллельных измерений яркости неба и прозрачности атмосферы солнечным фотометром CIMEL CE-318, входящим в мировую сеть аэрозольного мониторинга AERONET (Aerosol Robotic NET-work) [10].

Допущения, принятые при расчетах D/D -отношения

Отношение потоков рассеянного и прямого солнечного излучения зависит от аэрозольной и молекулярной оптических толщин τ_a и τ_R , коэффициентов аэрозольного и газового поглощения, альbedo подстилающей поверхности A_s и индикатрисы аэрозольного светорассеяния (ее среднего косинуса g_a). Введем модельную среду со взвешенными оптическими характеристиками:

$$\tau = \tau_a + \tau_R; \quad (1)$$

$$g = \Lambda_a g_a \tau_a (\Lambda_a \tau_a + \tau_R)^{-1}; \quad (2)$$

$$\Lambda = (\Lambda_a \tau_a + \tau_R) \tau^{-1}, \quad (3)$$

где индекс « a » обозначает аэрозольный параметр, а « R » — молекулярное (рэлеевское) рассеяние.

Измерения потоков рассеянного излучения выполняются радиометрами MFR-7 в пяти спектральных интервалах: 415, 500, 615, 673, 870 нм (спектральный канал, соответствующий длине волны 940 нм, используется для определения содержания водяного пара в столбе атмосферы). В этих пяти спектральных интервалах на потоки солнечного излучения, кроме процессов аэрозольного рассеяния и поглощения и рэлеевского рассеяния, может влиять поглощение озонем O_3 и двуокисью азота NO_2 . В фоновых ситуациях и O_3 , и NO_2 сосредоточены, в основном, в стратосфере, где в последнее десятилетие после очищения атмосферы от последствий извержения вулкана Пинатубо (1991 г.) концентрация аэрозоля значительно меньше, чем в тропосфере.

В связи с этим в первом приближении можно считать, что на тех длинах волн, где заметно поглощение озонем и двуокисью азота, процессы рэлеевского и аэрозольного рассеяния и газового поглощения разнесены по высоте и отношение G должно быть таким же, как и в отсутствие газов при оптической толщине, равной измеренной за вычетом части, обусловленной поглощением O_3 или NO_2 .

Авторам неизвестны данные, которые свидетельствовали бы о заметном влиянии стратификации слабопоглощающего аэрозоля (в отсутствие газового поглощения) и конкретной угловой зависимости коэффициентов направленного светорассеяния (при неизменном среднем косинусе) на величину потоков рассеянного излучения. Поэтому при расчетах использовалась модель плоскопараллельной вертикально однородной атмосферы без учета молекулярного поглощения, а в качестве модельных индикатрис рассеяния

света были выбраны индикатрисы рассеяния Хенни—Гринштейна [11]:

$$p(\psi) = (1 - g^2)(1 + g^2 - 2g \cos \psi)^{-3/2}, \quad (4)$$

в явном виде зависящие от g ; ψ — угол рассеяния. Расчеты потоков излучения как функции τ , g , Λ , зенитного угла Солнца θ и альbedo подстилающей поверхности A_s выполнялись по методу Монте-Карло (прямое моделирование, [12]); значения используемых в расчетах зенитных углов Солнца не превышали $\theta = 80^\circ$.

Подбор аппроксимирующих соотношений

Задача параметризации (как монохроматической, так и интегральной по спектру) рассеянной радиации имеет длительную историю. Сводка основных предложенных к концу предыдущего столетия формул дана в монографии В.А. Смеркалова [13], в которой автор предложил более точное, по сравнению с существовавшими на тот момент, соотношение:

$$G = \frac{\Gamma}{\Gamma + 4} \{ [\exp(\tau_s m) + 1] (1 + A_s \tau_s) - 2 \} m^{-1}, \quad (5)$$

где τ_s — оптическая толщина, обусловленная рассеянием; m — воздушная масса в направлении на Солнце ($m = \sec(\theta)$ для плоскопараллельной атмосферы); Γ — степень вытянутости индикатрисы рассеяния излучения, равная отношению потоков однократно рассеянного излучения в переднюю и заднюю полусферы:

$$\Gamma = \frac{\int_0^{\pi/2} p(\psi) \sin \psi d\psi}{\int_{\pi/2}^{\pi} p(\psi) \sin \psi d\psi}. \quad (6)$$

Сопоставление (5) с результатами расчетов потоков по методу Монте-Карло показало, что точности этой аппроксимации недостаточно для оценки аэрозольного поглощения. Поэтому, сохранив структуру (5), в работе [14] мы предложили более точную формулу:

$$G = \frac{c_1(\theta)}{1 - c_2(\theta)} \Lambda \exp \left[(\Lambda - 1) \frac{\tau}{0,7} \right] \times \{ [\exp(\tau m c_3(\theta)) + 1] (1 + A_s f_2(g) \tau^{f_1(g)}) - 2 \} m^{-1}. \quad (7)$$

Эмпирические функции $f_1(g)$ и $f_2(g)$, а также значения c_1 , c_2 и c_3 для четырех зенитных углов Солнца 45, 60, 70 и 80° приведены в [14]. Аппроксимация (7) была использована для оценок альbedo однократного рассеяния дымовых аэрозолей во время лесных и торфяных пожаров в Подмоскowie летом и осенью 2001 г. [15, 16]. Однако формула для G в виде (7), как будет показано ниже, непригодна при больших значениях альbedo подстилающей поверхности. Кроме того, желательно иметь аппроксимационное соотношение не для нескольких фиксированных зенитных углов Солнца, а для достаточно

широкого их диапазона. В предлагаемом в настоящей статье новом варианте параметризации отношения потоков прямого и рассеянного солнечного излучения за основу взято строгое соотношение [9]:

$$G = \frac{G_0 + A_s S(\tau, g, \Lambda) m^{-1}}{1 - A_s S(\tau, g, \Lambda)}, \quad (8)$$

где G_0 — значение G при $A_s = 0,0$, а $S(\tau, g, \Lambda)$ имеет смысл интегральной функции отражения. Из (8) следует, что невозможность использовать аппроксимацию (7) при больших значениях альbedo подстилающей поверхности обусловлена линейностью относительно A_s — в отличие от более сложной зависимости, определяемой последним соотношением.

На основе анализа большого массива расчетных данных [$\tau = 0,05-1,0$ (с шагом 0,05); $\Lambda = 0,8-1$ (0,05); $g = 0,2-0,6$ (0,2); $\theta = 45-80^\circ$ (5°); $A_s = 0-0,6$ (0,2)] предлагается следующая параметризация:

$$G_0 = \frac{c_1(\theta)g^{1.5} + c_2(\theta)}{1 + 0,533g} \Lambda \exp[(\Lambda - 1)\tau(0,05 + 1,35\theta)] \times \\ \times [\exp(-\tau c_3(\theta)\cos\theta) - 1] \cos\theta; \\ c_1(\theta) = -0,4073\theta^2 + 0,5728\theta - 0,1559, \\ c_2(\theta) = 0,909 - 0,28\theta, \\ c_3(\theta) = 0,612 + 0,223\theta, \quad (9)$$

где зенитный угол Солнца выражается в радианах.

Для функции $S(\tau, g, \Lambda)$ подобрана параметризация в виде

$$S = F_1(\Lambda, \tau) F_2(g) [1 - \exp(-F_3(g)\tau)]; \\ F_1(\Lambda, \tau) = \Lambda \exp[1,54(\Lambda - 1)\tau], \\ F_2(g) = 0,57 - 0,314g, \\ F_3(g) = 1,787 - 0,276(1 - g)^{-1}. \quad (10)$$

Распределение погрешностей параметризации по схеме (8)–(10) приведено на рис. 1.

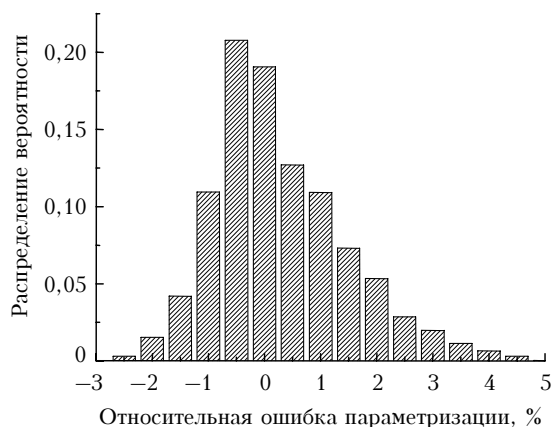


Рис. 1. Распределение ошибок параметризации отношения G рассеянного и прямого потоков излучения

Более 90% узлов описанной выше сетки параметров попадают в диапазон ошибок, не превышающих 2%. Наибольшие погрешности отмечаются для малых оптических толщин и зенитного угла Солнца 45° , а наименьшие — для больших оптических толщин и максимального из рассматриваемых зенитных углов — 80° . В силу монотонной зависимости G от альbedo однократного рассеяния при известных A_s и g значение Λ может быть легко найдено численными методами, а по его величине в соответствии с (3) восстановлено Λ_a . Для оценки A_s в случае отсутствия данных спутниковых или непосредственных измерений можно использовать измерения в ситуациях с минимальным аэрозольным наполнением атмосферы. В таких условиях, особенно в синей и зеленой областях спектра, средневзвешенный средний косинус будет близок к нулю, а средневзвешенное альbedo однократного рассеяния — к единице. Поэтому ошибки в задании g_a и Λ_a мало скажутся на величине G , что должно позволить оценить A_s при известном значении τ .

О возможности коррекции угловой характеристики радиометров типа MFRSR

Затеняемые фильтровые радиометры типа MFRSR (Multi-Filter Rotated Shadowband Radiometer) широко применяются для определения аэрозольной оптической толщины: прибором измеряют потоки спектральной суммарной и рассеянной радиации, по их разности определяют прямую радиацию, которая и используется для восстановления оптической толщины атмосферы. При проведении измерений прибор строго ориентирован по сторонам света.

Для каждого прибора с использованием искусственного источника излучения в лабораторных условиях промеряется нормированный угловой отклик в двух направлениях (север–юг и восток–запад). Это дает возможность вносить поправки на неидеальность косинусной характеристики радиометра при расчете прямой радиации, так как положение Солнца на небосводе в любой момент известно, а корректирующий коэффициент $R(\theta, \varphi)$ можно рассчитать как среднее с весом угловых расстояний до опорных плоскостей. Однако вопрос о возможности коррекции измеренных потоков рассеянного излучения является более сложным, поскольку угловое распределение интенсивности приходящей радиации *a priori* неизвестно, и требует отдельного анализа.

Проблема ошибок, возникающих вследствие отличия угловой характеристики полусферических приемников от ламбертовской, стала особо актуальной после того, как были выявлены расхождения между измеренными и рассчитанными потоками коротковолновой радиации в безоблачных условиях (см., например, [17]).

В работе [18] проведен анализ погрешностей, возникающих из-за неидеальности угловой характеристики и неучета поляризационной чувствительности приемника для нескольких типов радиометров, включая MFRSR. Значения погрешностей в [18] были

получены с использованием простейших моделей яркости неба, включая изотропную, и составили при неучете поляризационного эффекта $-1,5-1\%$ и реальной косинусной характеристики $-4-5\%$.

В отличие от [18] мы предприняли попытку исследовать ошибки, обусловленные неидеальностью косинусной характеристики радиометра для реалистических моделей аэрозоля, и проанализировать зависимость этих ошибок от оптических свойств аэрозоля и зенитного угла Солнца.

Для оценки ошибок измерений диффузной радиации на уровне подстилающей поверхности использовались результаты расчетов яркости неба $I^\downarrow(\xi, \varphi)$, рассчитанной методом локальной оценки в приближении плоскопараллельной аэрозольно-молекулярной атмосферы и однородной подстилающей поверхности, отражающей излучение по закону Ламберта [12]. Чувствительность приемников к состоянию поляризации падающего излучения на данном этапе не учитывалась. Яркость неба рассчитывалась для 84 азимутальных углов φ с шагом 1° по зенитному углу ξ . В качестве моделей микроструктуры аэрозоля были выбраны два различных типа распределений частиц по размерам, типичных для континентального аэрозоля: обратностепенное Ar^{-b} , $b = 3, 4, 5$, и логнормальное (медиана радиуса частиц $-0,05$ мкм, дисперсия логарифма радиуса частиц $-0,5$). Средние косинусы индикатрисы рассеяния излучения варьировали в диапазоне $0,53-0,75$.

Для моделирования отклика MFRSR яркость неба для каждого зенитного и азимутального углов умножалась на множитель $R_L(\xi, \varphi)$, значение которого выбиралось из таблицы, прилагающейся к документации прибора (MFR head S/N 425), и интегрировалась по полусфере. Отношение интегралов

$$R = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I^\downarrow(\xi, \varphi) R_L(\xi, \varphi) \cos \xi d\xi d\varphi}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I^\downarrow(\xi, \varphi) \cos \xi d\xi d\varphi} \quad (11)$$

рассматривалось как корректирующий фактор для рассеянного излучения. Примеры расчетов R проиллюстрированы на рис. 2, 3.

Из результатов вычислений следует, что «измеренные» MFRSR потоки на $2-4\%$ меньше «истинных» (потоки рассчитаны без учета и с учетом корректирующих множителей $R_L(\xi, \varphi)$ соответственно). Отношение R «истинного» к «измеренному» потоку достаточно слабо зависит от зенитного и азимутального углов Солнца, среднего косинуса индикатрисы рассеяния, длины волны, альbedo поверхности и аэрозольной оптической толщины. Наблюдается тенденция к уменьшению R с ростом оптической толщины. Максимум R как функции зенитного угла Солнца достигается примерно в области $60-70^\circ$. Анализ расчетов показывает, что при использовании корректирующих коэффициентов, соответствующих конкретному прибору, результаты измерений рассеянной радиации могут быть улучшены (с погрешностью, не превышающей $\approx 1\%$).

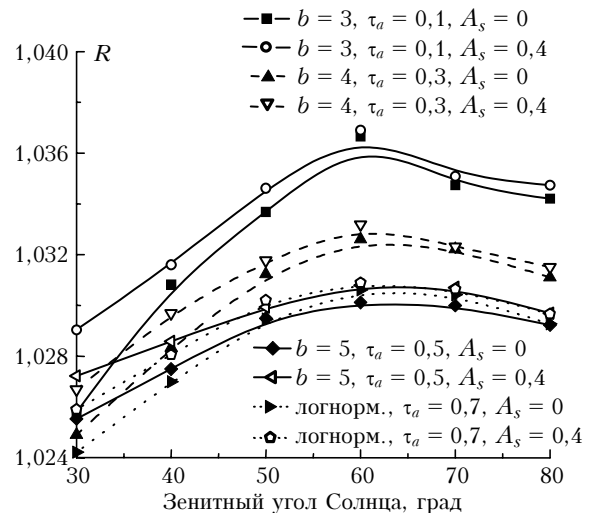


Рис. 2. Зависимость коэффициента коррекции от зенитного угла Солнца для длины волны $\lambda = 496$ нм

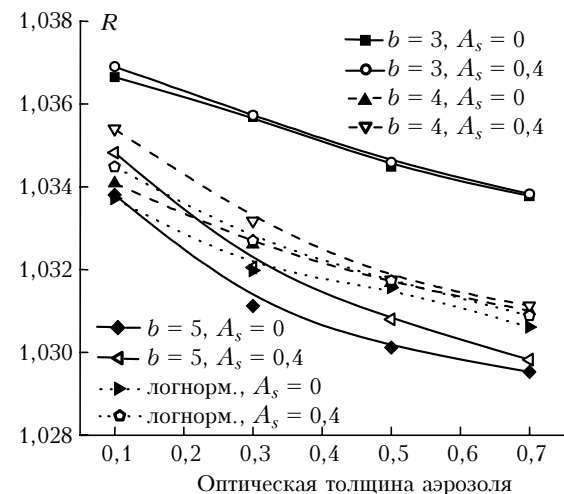
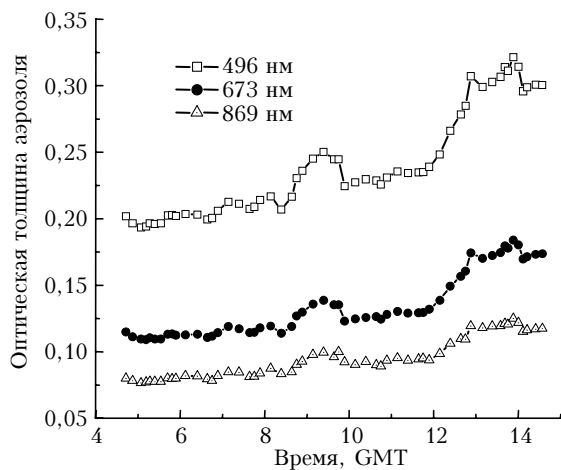


Рис. 3. Зависимость коэффициента коррекции от оптической толщины для зенитного угла Солнца 60° и длины волны $\lambda = 496$ нм

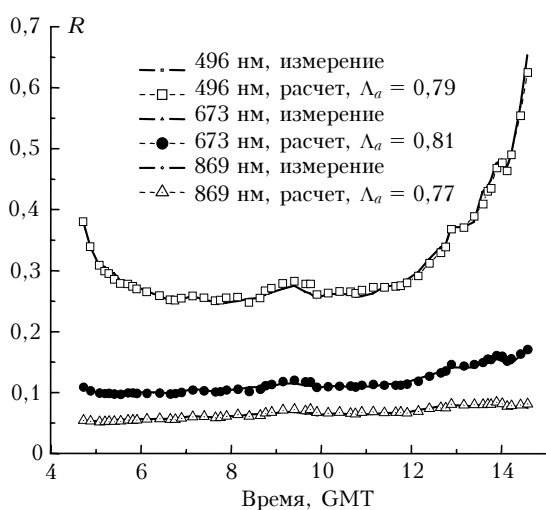
Сопоставление с данными наблюдений

С осени 2006 г. на Звенигородской научной станции ИФА РАН (г. Москва) ведутся измерения прозрачности атмосферы и яркости неба с помощью фотометра CIMEL CE-318, входящего в мировую сеть AERONET. Фотометры сети AERONET регулярно калибруются в NASA GSFC (Goddard Space Flight Center). Весной 2007 г. фотометр CIMEL работал параллельно с радиометром MFR-7. Три спектральных диапазона ($\sim 500, 670, 870$ нм) у CIMEL CE-318 и MFR-7 близки, поэтому при сравнении расчетов по (8)–(10) с данными наблюдений использовались оптические толщины на этих трех длинах волн, измеренные CIMEL, а отношение потоков, не зависящее от калибровок, выбиралось по данным MFR-7.

Сопоставление результатов расчетов с данными наблюдений проведено на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Временные ходы оптических толщин (а), измеренные и рассчитанные отношения потоков рассеянного и прямого солнечного излучения (б). Звенигород, 29.03.07

Альbedo подстилающей поверхности считалось равным 0,1 на длинах волн 496 и 673 нм и 0,25 на длине волны 869 нм (снежного покрова в Подмоскowie в это время уже не было). Средний косинус индикатрисы рассеяния принимался таким, каким он был бы у обратнoстепенного распределения частиц по размерам с показателем Ангстрема, равным измеренному CE-318. Как следует из рис. 4, несмотря на неполную синхронность измерений (MFR-7 измерял каждые 2 мин, а CIMEL – раз в 15 мин), расчеты по (8)–(10) адекватно описывают временной ход G на всех трех длинах волн. Отметим, что в эти дни наблюдались значительные внутрисуточные вариации оптических толщин. Полученные с использованием D/D -метода значения альbedo однократного рассеяния (28 марта 2007 г. – 0,80; 0,86; 0,80; 29 марта 2007 г. – 0,79; 0,81; 0,77) не противоречат результатам решения обратной задачи для этих дней, представленным на сайте AERONET [10] (0,80; 0,82; 0,80 и 0,80; 0,78; 0,775 соответственно).

Параметризация отношения потоков рассеянного и прямого солнечного излучения и ее использование...

Заключение

Предлагаемая нами параметризация D/D -отношения может, на наш взгляд, быть полезной при моделировании потоков рассеянного излучения и оценках аэрозольного поглощения. Учитывая, что погрешность современных солнечных фотометров при измерении оптической толщины аэрозоля составляет примерно 0,01, для получения удовлетворительных результатов необходимо достаточно большое аэрозольное замутнение атмосферы $\tau_a > 0,1$ (такие же ограничения накладываются и при использовании других дистанционных методов).

Для повышения точности оценок D/D нужны надежные данные о среднем косинусе индикатрисы аэрозольного рассеяния и альbedo подстилающей поверхности. Отметим, что при неизменных в течение дня свойствах аэрозоля и подстилающей поверхности g_a и A_s могут быть найдены с помощью зависимости G от зенитного угла Солнца. Возможность такой оценки, а также другие подходы к определению среднего косинуса по наблюдениям прозрачности атмосферы и яркости неба являются предметом отдельного рассмотрения.

Авторы благодарят Е.В. Горбаренко за предоставленную возможность провести наблюдения на радиометре MFR-7.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-05-00384) и МНТЦ (грант № 3254).

1. Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 3. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 19. № 7. С. 565–575.
2. Dubovik O., Holben B., Eck T.F., Smirnov A., Kaufman Y.J., King M.D., Tanre D., Slutsker Y. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. N 3. P. 590–608.
3. Павлов В.Е., Шестухин А.С. Яркость неба при нефелометрических углах рассеяния в аридных районах земного шара // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 16. № 5–6. С. 423–425.
4. Журавлева Т.Б., Павлов В.Е., Паинев В.В. Разностный метод определения аэрозольных оптических толщ рассеяния по данным о яркости неба в видимой области спектра: Часть 1 // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 4. С. 377–382.
5. Павлов В.Е., Журавлева Т.Б., Паинев В.В., Шестухин А.С. Интегральный метод определения оптической толщи рассеяния по данным о яркости неба // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 454–460.
6. Wang M., Gordon H.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.
7. Decaux C., Vermeulen J., Deuze J.L., Herman M., Sanne R. Retrieval of aerosol-single scattering albedo from ground-based measurements. Application to observational data // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103. N 8. P. 8753–8761.
8. Herman B.M., Browning R.S., De Luisi J.J. Determination of the effective imaginary term of the complex refractive index of atmospheric dust by remote sensing:

- The Diffuse-Direct radiation method // *J. Atmos. Sci.* 1975. V. 32. N 5. P. 918–925.
9. King M.D., Herman B.M. Determination of the ground albedo and the index of absorption of atmospheric particulates by remote sensing. Part I: Theory // *J. Atmos. Sci.* 1979. V. 36. N 1. P. 163–183.
 10. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
 11. Henyey L.G., Greenstein J.L. Diffuse radiation in the galaxy // *J. Astrophys.* 1941. V. 93. P. 70–83.
 12. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 283 с.
 13. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеониздат, 1997. 334 с.
 14. Anikin P., Sviridenkov M., Romashova E. Estimation of the aerosol single scattering albedo over ZSS from MFRSR data // Twelfth ARM Science Team Meeting: Proc. St. Petersburg, Florida. April 8–12. 2002. http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf12/extend_ed_abs/anikin-p.pdf
 15. Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Семтнникова Е.Г., Свириденков М.А., Шукуров К.А. Исследование состава задымленной атмосферы г. Москвы во время пожаров торфяников летом–осенью 2002 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана* 2004. Т. 40. № 3. С. 370–384.
 16. Тарасова Т.А., Горчакова И.А., Свириденков М.А., Аникин П.П., Ромашова Е.В. Оценка величины коротковолнового радиационного форсинга дымового аэрозоля с использованием данных радиационных измерений на Звенигородской научной станции летом 2002 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2004. Т. 40. № 4. С. 515–524.
 17. Kato S., Ackerman T.P., Clothiaux E.E., Mather J.H., Mace G.G., Wesely M.L., Murcray F., Michalsky J. Uncertainties in modeled and measured clear-sky surface shortwave irradiances // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 25881–25898.
 18. Kiedron P.W., Michalsky J.J. Measurements errors in diffuse irradiance with non-Lambertian radiometers // *Int. J. Remote. Sens.* 2003. V. 24. N 2. P. 237–247.

M.A. Sviridenkov, P.P. Anikin, T.B. Zhuravleva, I.M. Nasrtdinov. Parameterization of the ratio of diffuse to direct solar irradiances and its application to estimates of single scattering albedo with MFRSR type instruments.

An analytical parameterization of the ratio of diffuse to direct solar irradiances is proposed. The possibility to correct the data of measurements of diffuse radiation by radiometers of MFRSR's type is analyzed. Results of calculations with parameterization proposed are compared with the data of field observations.