

Т.Ю. Чеснокова, К.М. Фирсов, Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин

Спектроскопическое обеспечение для функционирования солнечного фотометра SP-6

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 10.09.2004 г.

Разработана методика, и создана компьютерная программа, позволяющая рассчитывать функции пропускания атмосферы и осуществлять параметризацию их зависимостей от поглощающей массы атмосферных газов.

Введение

В настоящее время в ИОА СО РАН ведутся работы по организации региональной автоматизированной сети солнечных фотометров SP-6(7) для мониторинга аэрозольной оптической толщи атмосферы и общего содержания ряда газовых компонентов (H_2O , O_3 и др.). Важным компонентом сети является информационная система, обеспечивающая работу сети [1]. В данной статье рассматривается спектроскопическая часть информационной системы, предназначенная для проведения массовых расчетов функций пропускания атмосферы, их параметризации и занесения этой информации в специализированную базу данных. Приводятся результаты исследования вариаций метеорологических параметров на изменчивость функций пропускания.

Влияние вариаций температуры на изменчивость функций пропускания

Для решения обратной задачи восстановления общего содержания газа и пропускания атмосферы, обусловленного молекулярным поглощением, из измерений прямого солнечного излучения радиометром SP-6 необходимо получить функциональную зависимость пропускания от поглощающей массы газа, причем желательно, чтобы это была простая параметрическая формула. Хорошо известно, что пропускание в полосах атмосферных газов зависит не только от поглощающей массы, но и от вертикальных профилей давления и температуры воздуха [2]. Если для используемого спектрального канала радиометра наблюдается заметная зависимость пропускания атмосферы от этих профилей, то разработка методики восстановления общего содержания газа проблематична, так как процесс измерения солнечной радиации, как правило, не сопровождается измерениями профилей температуры.

Следует заметить, что для широких спектральных интервалов, которые содержат полосы поглощения, обусловленные переходами из основного ко-

лебательного состояния, функции пропускания атмосферы обычно имеют слабую температурную зависимость, но тем не менее для каждого спектрального канала радиометра SP-6 такие исследования необходимы. Поэтому для параметризации функций пропускания и исследования влияния вариаций метеопараметров на точность получаемых аппроксимационных формул были проведены расчеты функций пропускания для различных метеорологических ситуаций и зенитных углов Солнца. Использовались следующие вертикальные профили метеопараметров:

1. Среднезональные метеорологические модели AFGL [3].

2. Данные аэрологического зондирования атмосферы на метеостанции г. Новосибирска, которые включают измеренные значения давления, температуры и удельной влажности в зимние и летние месяцы за 10 лет. Общее число наблюдений 483, в том числе для зимы – 117, для лета – 366.

3. Выборка наблюдений на метеостанции «Южная» (Томск) за год, которая включает: число, месяц, время измерения, температуру ($^{\circ}C$), давление (мм рт. ст.) на высоте 121 м от уровня моря.

На рис. 1, а приведены вариации температуры, а на рис. 1, б вариации концентрации водяного пара, характерные для летних условий г. Новосибирска. На рис. 2, а показана зависимость отношения пропускания атмосферы в двух каналах фотометра SP-6 от поглощающей массы водяного пара, рассчитанная прямым методом *line-by-line* [4], когда учитывались все спектральные линии в заданном диапазоне, и приведена двухпараметрическая аппроксимационная формула. Из рис. 2 видно, что для летних и зимних метеоусловий, реализуемых в Западной Сибири, функция пропускания в спектральном диапазоне вблизи 0,94 мкм определяется зависимостью от поглощающей массы паров воды и практически не зависит от вариаций температуры и давления воздуха, что и позволяет эффективно использовать эти каналы для определения общего содержания паров воды в вертикальном столбе атмосферы. Аналогичные результаты были получены для каналов SP-6 в области 2 мкм, которые предполагается использо-

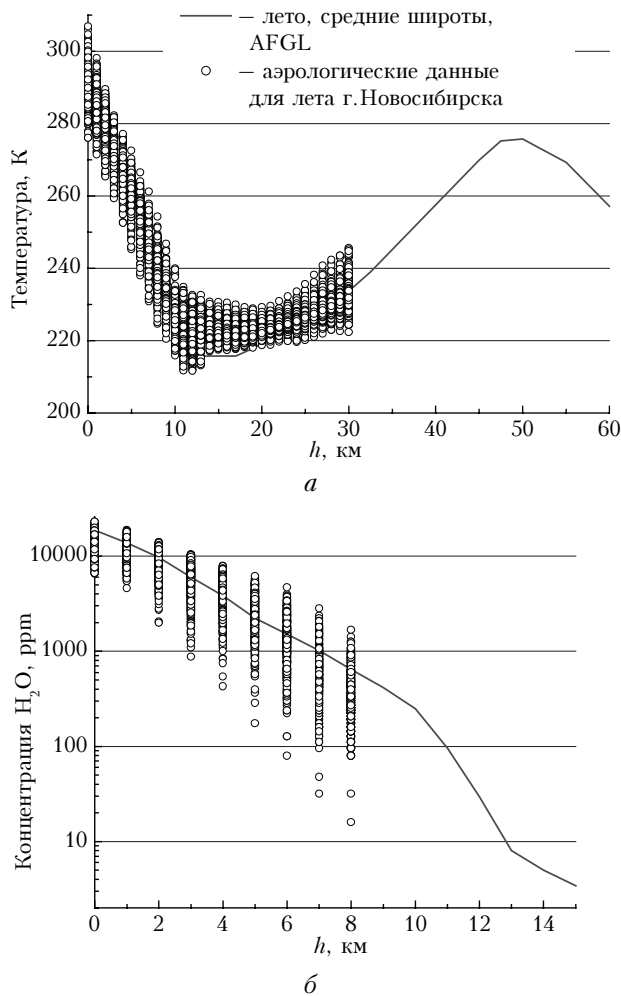


Рис. 1. Высотные вариации для летних условий: *а* – температуры атмосферы, *б* – концентрации водяного пара в атмосфере

вать для восстановления общего содержания CO_2 . Следует отметить, что пропускание атмосферы в области 2,06 мкм обнаружило зависимость от температуры воздуха. Так, например, из рис. 2, *б* видно, что пропускание атмосферы может меняться на величину 0,01. Однако наше моделирование показало, что эту погрешность можно уменьшить, если учесть корреляцию между пропусканием и приземным значением температуры воздуха. В этом случае отклонения в пропускании составили всего 0,006. Согласно вышеприведенным результатам возможно с хорошей точностью определить параметрическую зависимость функции пропускания от поглощающей массы атмосферных газов и не учитывать вариации профилей метеорологических параметров в атмосфере.

Параметризация функции пропускания атмосферных газов

Для параметризации функции пропускания атмосферы необходимо предварительно рассчитать набор этих пропусканий для различных углов Солнца

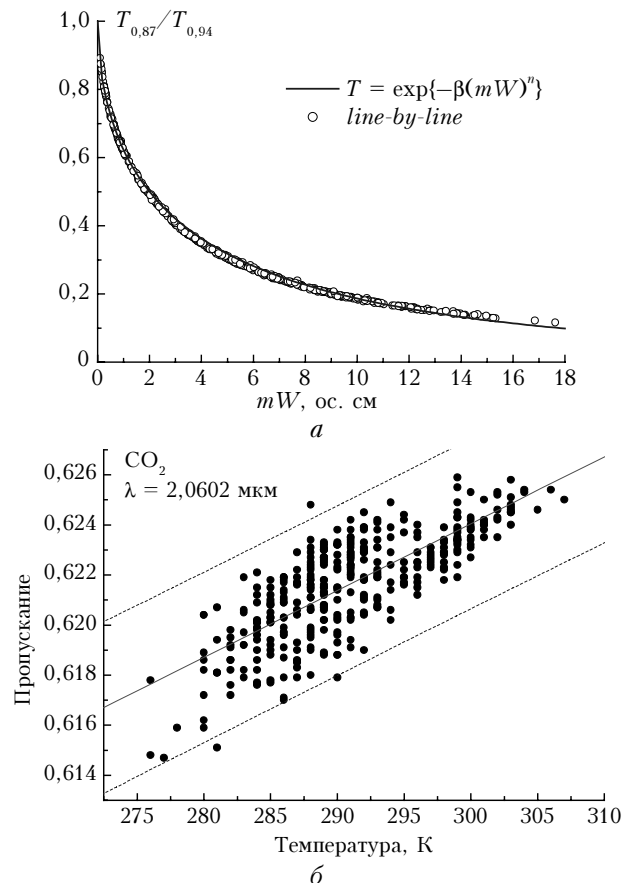


Рис. 2. Зависимость отношения пропускания атмосферы в двух каналах фотометра SP-6 от поглощающей массы водяного пара, рассчитанная прямым методом *line-by-line*, и по аппроксимационной формуле (*а*); зависимость пропускания от температуры воздуха. Вариации температуры согласно рис. 1, *а*. Сплошная линия – линейная регрессия (*б*)

и поглощающих масс, которые наблюдаются при экспериментальных измерениях. Кроме того, этот набор данных должен иметь достаточно представительную выборку, чтобы использовать регрессионные методы определения параметров. Наиболее последовательный способ получения такой выборки – это проведение прямого расчета функций пропускания методом *line-by-line* на основе данных аэрологического зондирования, описанных в предыдущем разделе. Однако такие расчеты занимают продолжительное время даже на современных ЭВМ, несмотря на то что используемая нами компьютерная программа является одной из самых быстрых. Это обстоятельство не является ограничением, когда проводятся научные исследования, однако в настоящее время в Западной Сибири создается сеть солнечных фотометров [1] и подобные расчеты необходимо периодически проводить для каждого радиометра, так как интерференционные фильтры имеют тенденцию стареть и менять свои спектральные характеристики со временем. Если учесть, что у солнечного фотометра SP-6 имеется 16 спектральных каналов, то временные затраты на прямой расчет функций пропускания становятся неприемлемыми для практики.

Согласно результатам, приведенным в предыдущем разделе, вариации профилей температуры и давления практически не сказываются на изменчивости функций пропускания атмосферы. Последнее обстоятельство позволило разработать быструю методику расчета функций пропускания для солнечных фотометров, которая основывается на архиве узкополосных функций пропускания атмосферы со спектральным разрешением 5 см^{-1} , насчитанных прямым методом с использованием базы параметров спектральных линий HITRAN-2000 (<http://www.hitran.com>) и современных моделей континуального поглощения (http://rtweb.aer.com/continuum_code.html) для различных зенитных углов Солнца и четырех сезонов (зима полярных широт, зима и лето умеренных широт и тропики) метеомодели AFGL. Начальная высота при расчете функции пропускания задавалась равной 120 м — это высота г. Томска над уровнем моря. Расчеты проводились для газов H_2O , CO_2 , O_3 , CH_4 , N_2O и других поглощающих газов, которые учитывались суммарно. Для каждого газа в архиве содержится значение поглощающей массы вертикального столба атмосферы. Спектральное разрешение 5 см^{-1} было выбрано таким, чтобы оно было много меньше спектральной ширины аппаратной функции. Расчет функции пропускания для заданного спектрального канала солнечного фотометра осуществлялся следующим образом:

$$T(\theta, \{W_i\}_{i=1}^6) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) I_0(\lambda) \prod_{i=1}^6 T_0(\lambda, \theta, W_i) d\lambda \Big/ \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) I_0(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где T_0 — значение узкополосной функции пропускания, взятой из архива, на длине волны λ , с зенитным углом Солнца θ и поглощающей массой i -го газа W_i ; $F(\lambda)$ — аппаратная функция рассматриваемого спектрального канала солнечного фотометра; $I_0(\lambda)$ — солнечная постоянная. В формуле (1) при расчете функций пропускания использовалось приближение произведения функций пропускания, которое при среднем спектральном разрешении дает хорошие результаты, а при усреднении по спектру, которое выполняется по формуле (1), погрешность этого приближения еще более уменьшается, и ее величина становится менее 1%, в силу того, что эти погрешности имеют осциллирующий характер.

Для расчета функций пропускания атмосферы для фотометра SP-6 и их параметризации была разработана диалоговая компьютерная программа, которая позволяет оператору проводить многовариантные расчеты и в графическом режиме просматривать результаты моделирования. При обработке данных измерений солнечным фотометром SP-6 необходимо иметь несколько типов функциональной связи пропускания и поглощающей массы, которые приведены в таблице. Для восстановления общего содержания водяного пара и других парниковых газов необходимо параметризовать функцию пропускания так, чтобы поглощающая масса входила явным образом и число параметров было минимальным при приемлемой

Аппроксимация	Назначение
$\ln T_w = f(mW)$	Градировка фотометра
$mW = f(\ln T_w)$	Расчет влагосодержания при измерении в основных каналах радиометра, в которых поглощает H_2O
$T_\lambda = f(\ln T_w)$	Учет H_2O во всех остальных каналах
$T_\lambda = f(mX)$	Учет O_3 и остальных газов

Примечание. $T_w = T_1/T_2$ — отношение функций пропускания в двух каналах радиометра; T_λ — функция пропускания в одном спектральном канале радиометра; mW — поглощающая масса водяного пара; mX — поглощающая масса O_3 и других газов.

точности аппроксимации. Оператор для аппроксимации зависимостей, представленных в таблице, имеет оптимальный набор формул, которые приведены ниже:

1. Зависимость функции пропускания от поглощающей массы одного газа для конкретного фильтра описывается тремя способами:

$$а) y_i = a_0 + a_1 \exp(a_2 x_i) + a_3 \exp(a_4 x_i); \quad (2)$$

$$б) y_i = a_0 + a_1 \exp(a_2 x_i); \quad (3)$$

$$в) y_i = \exp(a_0 x_i^{a_1}), \quad (4)$$

где y_i — значения пропускания для заданных значений поглощающей массы x_i ($x_i = m_i W$), $m_i = 1/\cos\theta_i$ — оптическая масса для зенитного угла θ_i . Поглощающая масса для водяного пара рассчитывается в размерности осажденные сантиметры (ос. см), а для остальных газов в размерности атм·см.

2. Зависимость поглощающей массы водяного пара mW от отношения функций пропускания атмосферы (T_1/T_2) для двух каналов фотометра описывается формулами:

а) прямая зависимость для расчета влагосодержания в атмосфере

$$mW = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4,$$

где

$$x = \ln(T_1/T_2); \quad (5)$$

б) обратная зависимость для калибровки фотометра-гигрометра

$$y = a_0 + a_1 x^{a_2},$$

где

$$y = \ln(T_1/T_2), x = mW. \quad (6)$$

3. Зависимость функции пропускания водяного пара T_3 от отношений функций пропускания T_1/T_2 , где T_1, T_2, T_3 рассчитаны с учетом трех разных спектральных фильтров солнечного фотометра:

$$y = y_0 + a_1 \exp(-(x - x_0)/t_1) + a_2 \exp(-(x - x_0)/t_2), \quad (7)$$

где $y = T_3$; $x = T_1/T_2$; $y_0, x_0, a_1, a_2, t_1, t_2$ — параметры подгонки.

Оператор ЭВМ имеет возможность выбрать необходимую аппроксимацию, после чего проводится расчет и на экран ЭВМ выводятся параметры функции пропускания, средняя сумма квадратов отклонений, максимальная абсолютная ошибка и макси-

мальная относительная ошибка, на основе которых он может принять решение об их использовании.

Для иллюстрации работы программы ниже приведены результаты моделирования для спектральных каналов солнечного фотометра SP-6 с центрами 0,87; 0,94 и 1,047 мкм. На рис. 3 показана зависимость функции пропускания на $\lambda = 0,94$ мкм от поглощающей массы паров воды при использовании различных аппроксимационных формул.

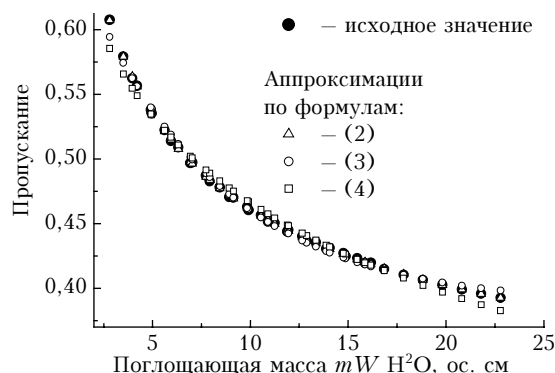


Рис. 3. Зависимость функции пропускания атмосферы от поглощающей массы mW на длине волны 0,94 мкм. Метеоусловия – лето средних широт и тропики

Наилучший результат был достигнут при использовании формулы (2): средняя сумма квадратов отклонений $S/n = 6,93 \cdot 10^{-7}$ (где n – число функций пропускания в выборке, полученной расчетным путем, $n = 200$), максимальная абсолютная ошибка $1,45 \cdot 10^{-3}$ и максимальная относительная ошибка 0,28%. Здесь и далее параметры функциональной зависимости пропускания от поглощающей массы определялись при помощи нелинейного метода наименьших квадратов Марквардта [5].

Было проведено моделирование для двух спектральных каналов фотометра SP-6 с центрами 0,87 и 0,94 мкм. Был рассмотрен диапазон изменения поглощающей массы водяного пара, характерный для метеомоделей лета средних широт и тропиков. При аппроксимации по формуле (5) средняя сумма квадратов отклонений $S/n = 1,14 \cdot 10^{-2}$, максимальная абсолютная ошибка 0,22, максимальная относительная ошибка 2,4%. При аппроксимации по формуле (6) средняя сумма квадратов отклонений $S/n = 2,65 \cdot 10^{-5}$, максимальная абсолютная ошибка 0,014, максимальная относительная ошибка 3%. Погрешность аппрок-

симации можно значительно уменьшить, если выбрать более узкий диапазон изменения mW , например вести расчет функций пропускания только для условий лета умеренных широт. В этом случае максимальная относительная погрешность аппроксимации по формуле (5) уменьшилась до 0,9%, а по формуле (7) до 1,5%.

Зависимость функции пропускания T_3 для длины волны 1,047 мкм от отношения пропускания T_1/T_2 (для длин волн 0,94 и 0,87 мкм) хорошо описывается формулой (6), максимальная абсолютная ошибка составляла 0,0004, а максимальная относительная ошибка 0,014%.

Заключение

Осуществлена параметризация зависимости функции пропускания излучения от поглощающих масс атмосферных газов для спектральных каналов солнечного фотометра SP-6. Показано, что параметры функции пропускания слабо зависят от вариаций температуры во всем слое атмосферы и приземного давления воздуха. Разработана методика, и создана компьютерная программа расчета и параметризации полосовых функций пропускания, обусловленных поглощением атмосферными газами в спектральном интервале 0,4–5 мкм. Данная программа позволяет оперативно проводить расчеты широкополосных функций пропускания с учетом аппаратной функции спектрофотометра для различных метеоусловий и зенитных углов Солнца.

Работа выполняется при финансовой поддержке школы С.Д. Творогова (НШ-373.2003.5), гранта РФФИ № 04-07-90123, проекта 2.12.1 программы специализированных отделений РАН.

1. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С. Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Часть I. Солнечные фотометры // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 354–360.
2. Гуду П. Атмосферная радиация. М.: Мир, 1966. 417 с.
3. Anderson G., Clough S., Kneizys F., Chetwynd J., Shettle E. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km). Air Force Geophys. Laboratory. AFGL-TR-86-0110. Environ. Res. Paper No. 954. 25 p.
4. Мицель А.А., Фирсов К.М., Фомин Б.А. Перенос оптического излучения в молекулярной атмосфере. Томск: STT, 2001. 444 с.
5. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. М.: Мир, 1982. 488 с.

T. Yu. Chesnokova, K.M. Firsov, D.M. Kabanov, S.M. Sakerin. Spectroscopic provision for functioning of SP-6 sun photometer.

A technique and a computer program are developed for calculation of atmospheric transmission functions and parameterization of their development on the absorbing mass of atmospheric gases.