

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.501

С.И. Долгий, В.В. Зуев, В.Н. Маричев

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРЯМОЙ И РАССЕЯННОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск

Поступила в редакцию 30.12.97 г.

Принята к печати 10.12.98 г.

Представлено описание спектрофотометра для исследования спектральной изменчивости прямой и рассеянной солнечной радиации, описаны методики измерения и калибровки, приводятся некоторые результаты, полученные во время измерительной кампании 1996 г.

Одним из существенных факторов, определяющих радиационный режим атмосферы Земли, является влияние облачности на спектральный ход нисходящих потоков коротковолновой части солнечной радиации. Исследование спектров излучения дает важную информацию для расчета переноса радиации в атмосфере [1, 2].

В статье представлены методики измерений и обработки данных, описана конструкция спектрофотометра, созданного для регистрации прямой и рассеянной солнечной радиации в спектральном диапазоне 400–700 нм, а также приведены результаты измерений, полученные в 1996 г.

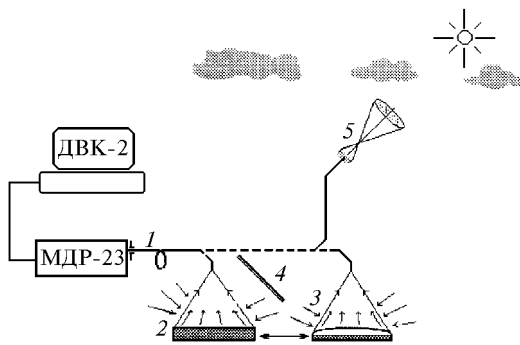


Рис. 1. Блок-схема спектрофотометра

Аппаратура и методика измерений

Измерения прямой и рассеянной солнечной радиации проводились спектрофотометром, созданным на базе спектрально-вычислительного комплекса КСВУ-23. В состав последнего входит монохроматор МДР-23, центр управления и сбора данных на основе мини-ЭВМ ДВК-2. Центр управления состоит из блоков управления шаговым двигателем монохроматора, высоким напряжением ФЭУ и платы сбора данных, на которой находится 12-разрядный (быстродействие 20 кГц) 6-канальный АЦП. В качестве приемника использовался фотоумножитель ФЭУ-100. Регистрируемый спектральный диапазон и спектральное разрешение составляли 400–700 нм и 1 нм соответственно. Время записи единичного спектра – 1 мин. Запись информации производилась на магнитный носитель. Дальнейшая обработка выполнялась на IBM PC. Подвод солнечного излучения в монохроматор осуществлялся световодом 1

диаметром 1 мм (рис. 1). Один конец световода подводился к щели монохроматора, другой помещался за фокальной плоскостью линзы приемного телескопа 5 (при измерениях прямого солнечного излучения) либо направлялся на диффузно рассеивающий гипсовый экран 2 или выпуклое зеркало 3 (при all-sky измерениях). При измерениях с помощью диффузно рассеивающего экрана или выпуклого зеркала устранение вклада прямого солнечного излучения осуществлялось с помощью затемняющего экрана 4. Отношение суммарной площади изображения, занимаемой элементами конструкции и экраном, ко всей площади небесной полусферы не превышало 1,5%.

Калибровка спектрофотометра проводилась на лампе ТРШ-2750, спектр которой  $L_T$  был известен. В результате получены калибровочные кривые для измерений по прямому солнечному излучению, по диффузно рассеивающему экрану или по выпуклому зеркалу (рис. 2, правая ось).

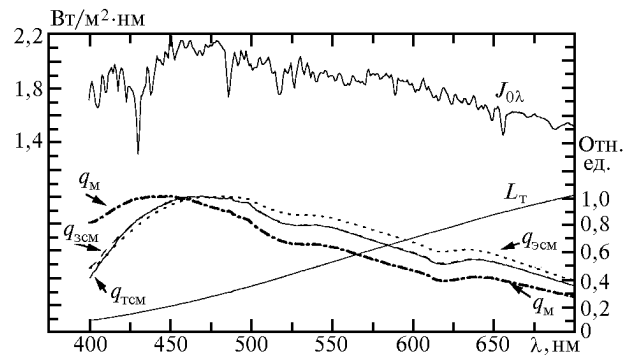


Рис. 2.  $J_{0\lambda}$  – внеатмосферная солнечная постоянная; нормированные на максимум калибровочные кривые;  $L_T$  – теоретическая кривая лампы ТРШ-2750;  $q_M$  – спектральная чувствительность монохроматора;  $q_{ЗСМ}$ ,  $q_{ТСМ}$ ,  $q_{ЭСМ}$  – спектральная чувствительность трактов зеркало – световод – монохроматор, телескоп – световод – монохроматор, экран – световод – монохроматор соответственно

Так как для облачных образований в видимой области спектра ход коэффициента ослабления в зависимости от длины волны меняется достаточно плавно, исходные сигналы были сглажены по пяти точкам, что уменьшило случайную погрешность, и окончательное разрешение составляло 5 нм. В качестве анализируемых параметров рассматривались:

– спектральная оптическая толщина, приведенная на единицу массы воздуха;

– нормированный на внеатмосферный солнечный спектр спектральный поток рассеянной небом солнечной радиации, приведенный на единицу массы воздуха и записанный в относительных единицах.

В общем случае регистрируемый сигнал можно записать в виде

$$U_{\lambda}(\theta) = C q_{\lambda} J_{0\lambda} T_{\lambda a}(\theta) T_{\lambda m}(\theta), \quad (1)$$

где  $C$  – константа, определяемая из измерений;  $q_{\lambda}$  – спектральная чувствительность спектрофотометра;  $J_{0\lambda}$  – внеатмосферная солнечная постоянная [3] (см. рис. 2, левая ось);  $T_{\lambda a}(\theta)$  – спектральная прозрачность атмосферного аэрозоля при зенитном угле Солнца  $\theta$ ;  $T_{\lambda m}(\theta)$  – спектральная прозрачность атмосферного воздуха (молекулярное рассеяние и поглощение света) при зенитном угле Солнца  $\theta$ :

$$T_{\lambda a}(\theta) = \exp(-\tau_{\lambda a}/\cos\theta),$$

$$T_{\lambda m}(\theta) = \exp(-\tau_{\lambda m}/\cos\theta), \quad (2)$$

где  $\tau_{\lambda a}$  и  $\tau_{\lambda m}$  – спектральная оптическая плотность аэрозольных и молекулярных воздушных масс атмосферы ( $\tau_{\lambda m}$  определяется по формуле Пендорфа,  $\tau_{\lambda m} = 1,545 \cdot 10^{10} \cdot \lambda^{-4,086}$ ). Хотя в исследуемой области спектра и присутствуют слабые полосы поглощения таких газовых составляющих, как озон, двуокись углерода, кислорода и водяного пара, но их вклад в ослабление по сравнению с аэрозольным и молекулярным рассеянием незначителен.

Для случая измерения прямого солнечного излучения преобразуем (1) к виду

$$U_{\lambda}(\theta)/q_{\lambda} J_{0\lambda} = U_{\lambda}^0(\theta) = C T_{\lambda a}(\theta) T_{\lambda m}(\theta). \quad (3)$$

Прологарифмируем выражение (3) для двух зенитных углов Солнца  $\theta_1$  и  $\theta_2$ :

$$\ln U_{\lambda}^0(\theta_1) = \ln C - \frac{\tau_{\lambda a}}{\cos\theta_1} - \frac{\tau_{\lambda m}}{\cos\theta_1}, \quad (4)$$

$$\ln U_{\lambda}^0(\theta_2) = \ln C - \frac{\tau_{\lambda a}}{\cos\theta_2} - \frac{\tau_{\lambda m}}{\cos\theta_2}. \quad (5)$$

Домножая выражения (4) и (5) на  $1/\cos\theta_2$  и  $1/\cos\theta_1$ , вычтем (5) из (4) и получим уравнение для определения константы  $C$ :

$$\frac{1}{\cos\theta_2} \ln [U_{\lambda}^0(\theta_1)] - \frac{1}{\cos\theta_1} \ln [U_{\lambda}^0(\theta_2)] = \left( \frac{1}{\cos\theta_2} - \frac{1}{\cos\theta_1} \right) \ln C. \quad (6)$$

Из формулы (6) определим

$$C = \exp \left\{ \frac{\frac{1}{\cos\theta_2} \ln [U_{\lambda}^0(\theta_1)] - \frac{1}{\cos\theta_1} \ln [U_{\lambda}^0(\theta_2)]}{\frac{1}{\cos\theta_2} - \frac{1}{\cos\theta_1}} \right\}, \quad (7)$$

тогда из (2) и (3) получим

$$\tau_{\lambda a} = \ln C T_{\lambda m} / U_{\lambda}^0. \quad (8)$$

При измерении с помощью выпуклого зеркала  $\tau_{\lambda a}$  определился по формуле (8), а при использовании диффузно рассеивающего экрана по аналогии с вышеизложенным получим

$$\tau_{\lambda a} = \cos\theta \ln \left[ \frac{C \cos\theta T_{\lambda m}(\theta)}{U_{\lambda}^*} \right], \quad (9)$$

где  $U_{\lambda}^* = \frac{U_{\lambda\Sigma} - F}{q_{\lambda} J_{0\lambda}}$ , в котором  $U_{\lambda\Sigma}$  – суммарный (прямой плюс рассеянный) и  $F$  – рассеянный потоки солнечного излучения.

### Результаты измерений

За время проведения измерительной кампании 1996 г. было зарегистрировано более 200 спектров солнечной радиации в диапазоне 400–700 нм. Из них более 90% – спектры рассеянной солнечной радиации.

На рис. 3 представлены результаты восстановления спектральной оптической толщи аэрозоля за 8 октября 1996 г. с 2 до 18 ч местного времени при измерениях прямого солнечного излучения. Нижние кривые 1–4 получены при регистрации прямого солнечного излучения в условиях чистого неба и через очень слабые облачные слои, кривые 5–8 – через более плотные полупрозрачные облака верхнего яруса. Для сравнения треугольниками обозначены оптические толщи, определенные с помощью независимых измерений звездно-солнечным спектрофотометром [4] в 13 ч 58 мин в условиях чистого неба.

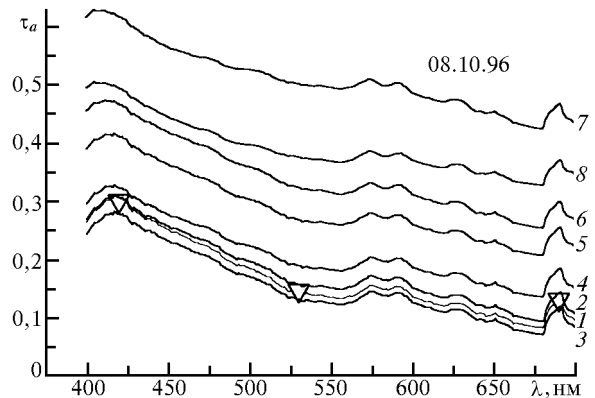


Рис. 3. Спектральная оптическая толщина аэрозоля

Потоки рассеянного солнечного излучения измерялись с помощью гипсового диффузно рассеивающего экрана. На рис. 4 представлены характерные кривые спектральной зависимости потоков рассеянной радиации, полученные при безоблачном небе (кривая 8), при сильной сплошной низкой (нижнее семейство кривых) и сплошной высокой облачности (верхнее семейство).

Для рассеяния в воздухе (кривая 8) наблюдается монотонное убывание потока при увеличении длины волны. Отношение величин потоков в начале (400 нм) и конце диапазона (700 нм) составляет 2,5–2,7. Кривая не совсем гладкая. Так, можно выделить минимумы в районах 465, 550, 580, 680 нм и в целом заметный провал между 550 и 650 нм. Если обратиться к кривым 1–5 (см. рис. 4), описывающим рассеяние в сплошных просвечивающих облаках, то видно, что и на них повторяется спектральная структура,

подобная той, которая наблюдается при рассеянии в безоблачном небе (кривая 8). Но в отличие от последней эта структура более выражена, ее абсолютная амплитуда в несколько раз больше, хотя относительные амплитуды примерно равны. На данных кривых практически отсутствует тренд монотонного убывания спектрального потока. Особенно заметен нейтральный ход спектральных кривых для низкой, сплошной и сильной облачности (кривые 9, 10, 11, рис. 4). При этом практически полностью размывается спектральная структура. Различие в ходе кривых 2, 4, 6 и 7, относящихся к одному типу облачности, вероятно, можно объяснить их разной оптической толщиной, контроль которой не проводился.

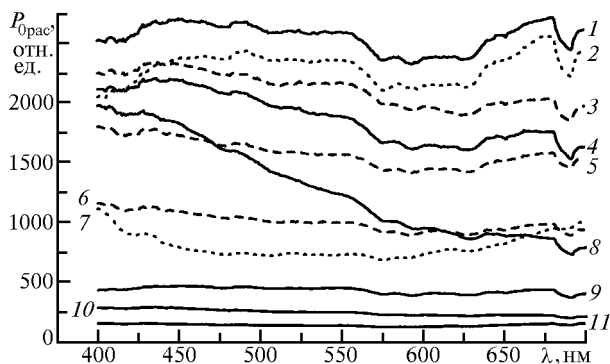


Рис. 4. Поток солнечной радиации в условиях сплошной облачности: кривая 1 – 10/Cs fib, дымка сильная; 2 – 10/Sc trans; 3 – 9/Ac und; 4 – 10/Sc; 5 – 10/Ac floc, Ac und 6–7; 6 – 10/Sc trans; 7 – 10/Sc op; 8 – безоблачно; 9 – 10/Sc, St; 10 – 10/St; 11 – 10/Sc und

Кривые спектральных потоков для условий разорванной облачности (до 6 баллов) приведены на рис. 5. Для них, как и в случае безоблачного неба (кривая 5), с возрастанием длины волны отмечается убывание спектрального потока. Но оно менее выражено. Здесь, как и для кривых, изображенных на рис. 4, прослеживается спектральная структура. Если возвратиться к рис. 3, то из него видно, что на всех кривых проявляются колебания, которые находятся в противофазе с колебаниями кривых спектральных потоков, представленных на рис. 4 и 5. Последнее означает, что наблюдаемые максимумы обусловлены поглощением излучения атмосферными газами. Особенно выделяется пик в центре на длине волны 690 нм, принадлежащий полосе поглощения кислорода и водяного пара [5].

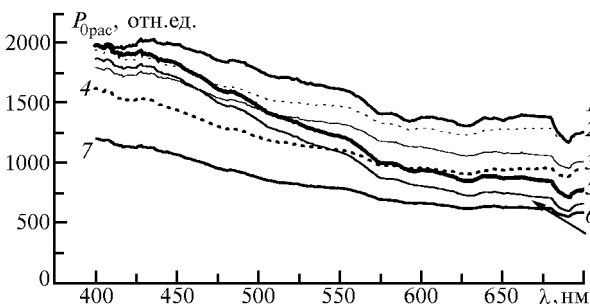


Рис. 5. Поток солнечной радиации в условиях разорванной облачности: кривая 1 – 0–1/Cs; 2 – 2/Ci fib–6/Cu hum; 3 – 6/Cu hum, med; 4 – 3/Ac und; 5 – безоблачно; 6 – 2/Ci–2/Ac cuf; 7 – 2/Ac cuf, дымка

Предварительный анализ полученного массива данных по потокам рассеянной солнечной радиации показал возможность использования метода линейной регрессии для всего спектрального диапазона 400–700 нм. Так как большинство кривых имеет явный перегиб в районе 575 нм, то спектральный диапазон был разделен на два поддиапазона. Тангенс угла наклона кривых в зависимости от балла облачности поддиапазонов 400–575 и 575–700 нм представлен на рис. 6. Прямыми на рисунке показан результат линейного регрессионного анализа для этих двух полученных массивов. Для верхней прямой тангенс угла наклона равен  $0,28 \pm 0,042$ , для нижней –  $0,404 \pm 0,047$ .

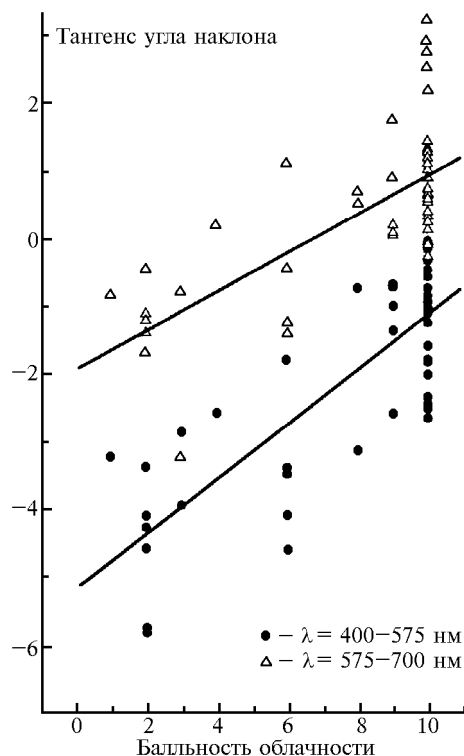


Рис. 6. Зависимость тангенса угла наклона кривых потоков солнечной радиации от балльности облачности для диапазонов 400–575 (точки) и 575–700 нм (треугольники)

На основании анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

- 1) в условиях разрывной облачности и безоблачного неба с увеличением длины волны наблюдается монотонное убывание спектрального потока, обусловленное аэрозольным ослаблением и молекулярным рассеянием света;
- 2) структура спектрального потока для условий сплошной просвечивающей облачности и безоблачного неба формируется за счет молекулярного поглощения излучения;
- 3) для условий низкой сплошной и плотной облачности ход кривой спектрального потока имеет нейтральный вид и определяется рассеянием на облаках, при этом происходит замывание спектральной структуры потока;
- 4) наклон кривых в диапазоне 400–575 нм сильнее зависит от балльности облачности и типа облаков, чем в диапазоне 575–700 нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки России (рег. № 01-64) на установке «Сибирская лидарная станция».

1. Гуди Р.М. Атмосферная радиация: Пер. с англ. / Под ред. К.Я. Кондратьева. М.: Мир, 1966. 522 с.
2. Росс Ю. и др. Облачность и радиация. Тарту, 1975. 251 с.
3. Arvesen John C. et al. // Appl. Optics. 1969. V. 8. N 11. P. 2215–2232.
4. Абрамочкин А.И., Галилейский В.П. и др. // Измерения оптико-метеорологических параметров атмосферы с использованием лазерного излучения. Томск: ИОА СО АН СССР, 1981. С. 14–19.
5. Биненко В.И., Кондратьев К.Я. Вертикальные профили радиационных характеристик типичных облачных образований // Тр. ГГО. 1975. Вып. 331. С. 3–17.

*S.I. Dolgii, V.V. Zuev, V.N. Marichev. Investigation of Spectral Variability of Direct and Scattered Solar Radiation.*

In this paper we present the description of a spectrophotometer we used to study the spectral variability of direct and scattered solar radiation. We also describe the measurement and calibration techniques used. Same results of field measurements carried out in 1996 year campaign are presented.