

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.521.17+551.510.534(571.5)

А.Ю. Шалин, А.В. Михалев

Выделение прямой ультрафиолетовой радиации при измерениях спектрофотометром с широкой входной апертурой

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 8.08.2001 г.

Проводится оценка вклада прямой и рассеянной ультрафиолетовой радиации (295–345 нм) при измерениях спектрофотометром с фиксированной входной апертурой (центральный угол $\sim 32^\circ$). Показано, что в некотором диапазоне угловых высот Солнца и длин волн представляется возможным выделить из регистрируемых сигналов компоненту прямой ультрафиолетовой радиации (УФР).

Процедура выделения прямой УФР была применена при обработке и анализе регистрируемых в г. Иркутске в 1998–2000 гг. ежедневных околополуденных значений УФР. Полученные экспериментальные данные амплитуды годового хода УФР в г. Иркутске (диапазон угловых высот Солнца $\sim 14\text{--}60^\circ$) сопоставлялись с расчетными значениями амплитуд годового хода прямой и рассеянной УФР. Сделан вывод, что наблюдаемые изменения регистрируемой УФР в большей степени согласуются с изменениями прямой радиации. Предложенный метод выделения прямой УФР используется при мониторинге и исследовании долговременных, например межсезонных и межгодовых, изменений УФР.

Введение

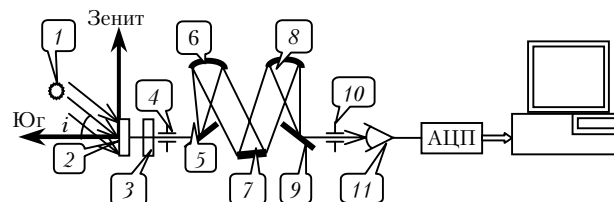
В ряде задач при исследовании приземной ультрафиолетовой радиации (УФР) необходимо иметь прибор, который может регистрировать прямую радиацию Солнца в течение длительного периода времени. Конструктивно такие приборы из-за наличия следящих систем достаточно сложны и для решения некоторых задач возникает необходимость применять прибор со статическим расположением входного оптического тракта.

В настоящей статье рассматриваются возможность и условия выделения прямой УФР при измерениях спектрофотометром с фиксированной входной апертурой. Представлены результаты наблюдений приземной УФР в г. Иркутске (52° с.ш., 102° в.д.), регион Восточной Сибири. Особенность пункта наблюдения связана с тем, что Сибирский регион является зоной устойчивого азиатского антициклона, в котором до последнего времени в отдельные периоды отмечались аномально низкие значения общего содержания озона (СОС) [1–4].

Аппаратура и методика измерений

В г. Иркутске с осени 1998 г. проводятся ежедневные измерения околополуденных значений УФ-радиации в диапазоне длин волн 295–345 нм с помощью спектрометра, созданного на базе комплекса «КСВУ-12» (ЛОМО) и ЭВМ типа IBM AT. Структурная схема спектрометра приведена на рисунке. Излучение Солнца и неба, достигающее входного кварце-

вого матового стекла, проходит через светофильтр и попадает на входную щель монохроматора МДР-12. Пройдя монохроматор, излучение, в разделенном по спектральному составу виде, поступает на ФЭУ-100 и усиленное им преобразуется на двенадцатиразрядном АЦП и далее записывается в компьютер. Одновременно



Структурная схема спектрометра: 1 – Солнце и небо; 2 – матовое кварцевое стекло; 3 – фильтр УФС-5; 4 – входная щель; 5, 9 – коллиматорные зеркала; 6, 8 – сферические зеркала; 7 – поворотная дифракционная решетка; 10 – выходная щель; 11 – ФЭУ

производится поворот отражающей дифракционной решетки, чем обеспечивается сканирование по выбранному спектральному диапазону. Матовое кварцевое стекло необходимо для обеспечения постоянного присутствия прямой радиации Солнца на входной щели монохроматора. Для исключения рассеянного внутри монохроматора света видимого диапазона перед входом установлен абсорбционный светофильтр УФС-5.

Регистрируется радиация, падающая на неподвижную вертикальную матовую кварцевую площадку, ориентированную в южном направлении. Угловая полуширина поля зрения оптического тракта составляет $\alpha \approx 32^\circ$. Спектральное разрешение при сканировании

по спектру составляет около 0,2 нм, шаг сканирования 0,02 нм, скорость сканирования ~ 0,33 нм/с. Стабильность измерительного тракта контролируется ежедневно с помощью опорного светового источника и все измеренные данные корректируются по этой калибровке. Для абсолютной калибровки системы использовалась ленточная вольфрамовая лампа с кварцевым окном мощностью 200 Вт. В статье описывается процедура, с помощью которой можно из регистрируемого сигнала определить прямую УФ-радиацию. Поэтому к преобразованным экспериментальным данным дополнительно можно применить метод прямых Бугера для привязки измеренной радиации к табличным значениям внеатмосферной радиации на исследуемых длинах волн. С этой целью строились зависимости десятичного логарифма преобразованных значений измеренной радиации от оптической массы атмосферы и после экстраполяции полученных прямых значение функции при оптической массе, равной нулю, приравнявалось к табличному значению внеатмосферной радиации на данной длине волны.

Обычно при построении прямых Бугера используется один день для проведения измерений с различными оптическими массами m [5]. Мы применили эту процедуру на полугодовом временном масштабе с эквивалентным диапазоном изменений оптических масс. При применении метода Бугера использовались ясные дни с наибольшей прозрачностью атмосферы. При таком подходе можно говорить о некоторой эквивалентности закона Бугера, полученного по однодневным и полугодовым измерениям. Отличия заключаются во временных масштабах стабильности атмосферы.

Расчеты и анализ результатов

При измерении УФР на произвольно ориентированной площадке прибором с конечной входной апертурой (т.е. с ограниченного участка неба) всегда регистрируется как прямая, так и часть рассеянной радиации, причем уровни регистрируемой радиации зависят от угловой чувствительности приемника и положения источника излучения.

В Иркутске измерения проводились при прохождении Солнцем оптической оси системы в одно и то же время суток (12:30 местного зимнего времени). Используемая схема измерений потребовала оценки вклада прямой S и рассеянной D радиации в регистрируемые сигналы и определения методики обработки сигналов с целью их дальнейшего анализа.

Поскольку приемный тракт имеет зависимость чувствительности от угла прихода излучения, то в общем виде регистрируемую радиацию можно записать в виде

$$J_{\text{рег}} = Sk(i, \phi) + \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D(\theta, \varphi) k(\theta, \varphi) d\theta d\varphi, \quad (1)$$

где i – угловая высота Солнца; ϕ – азимут Солнца относительно оси прибора; $J_{\text{рег}}$ – уровни радиации,

регистрируемые прибором; θ и φ – углы, определяющие направление от оси прибора на точку небосвода; $k(i, \phi)$ и $k(\theta, \varphi)$ – коэффициенты угловой чувствительности прибора в направлении на Солнце и на заданную точку небосвода соответственно; $D(\theta, \varphi)$ – радиация, рассеянная из заданного направления. При проведении измерений в один и тот же момент времени суток зависимость $k(i, \phi)$ является неизменной от ϕ , поэтому переменная ϕ исключается и далее рассматривается коэффициент $k(i)$.

Так как приемный оптический тракт измерительной системы обладает конечной угловой апертурой, то регистрируется только часть рассеянной радиации неба, определяемая геометрическим коэффициентом F_g , который задается как доля небесной полусферы, видимая в поле зрения прибора. Эта рассеянная радиация приходит из участка неба, находящегося перед входным окном в пределах полуширины угловой апертуры. Для прямой и рассеянной радиации и их соотношения существуют теоретические и экспериментальные данные, полученные при различных высотах Солнца и прозрачности атмосферы [6, 7]. Используя их, в выражении (1) можно записать рассеянную радиацию через прямую, применив коэффициенты $d(i) = D/S(i)$ – отношение радиации, рассеянной из всей небесной полусферы, к прямой радиации и $\delta(i)$ – зависимость яркости участка неба перед прибором при удалении диска Солнца от оси визирования на угол i . Таким образом, второе слагаемое правой части формулы (1) можно оценивать с помощью выражения

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D(\theta, \varphi) k(\theta, \varphi) d\theta d\varphi = SF_g \delta(i) d(\lambda, i). \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) можно определить прямую УФР:

$$S(\lambda, i) = \frac{J_{\text{рег}}(\lambda, i)}{k(i) \left\{ 1 + \frac{F_g \delta(i) d(\lambda, i)}{k(i)} \right\}}. \quad (3)$$

Для использования формулы (3) необходимо определить коэффициенты $k(i)$, $\delta(i)$, $d(\lambda, i)$ и F_g для данного прибора. Значения рассеянной с полусферы и прямой радиации в УФ-диапазоне при различных высотах Солнца, альbedo поверхности A и мутности атмосферы использовались из работы [6], и по ним определялся коэффициент $d(\lambda, i)$. Коэффициент $k(i)$ определялся экспериментально по точечному источнику. В поле зрения прибора попадает половина сегмента сферы с центральным углом α , так как входное окно расположено вертикально и нижняя половина этого сегмента находится ниже линии горизонта. На основании стереометрических формул $F_g = \sin^2(\alpha/4)$. Коэффициент F_g рассчитывался по данным от точечного источника и равен 0,02. Для оценок значение коэффициента $\delta(i)$ принималось равным 1 при $i = 15 \div 30^\circ$ и 0,5 при $i = 45 \div 60^\circ$.

Величина $F_g \delta(i) d(\lambda, i) / k(i)$ показывает относительный вклад рассеянной радиации при единичном вкладе прямой радиации в регистрируемую радиацию. В случае, когда $F_g \delta(i) d(\lambda, i) / k(i) \ll 1$ формула (3) преобразуется в выражение

$$S(\lambda, i) = J_{\text{рег}}(\lambda, i) / k(i). \quad (4)$$

В ряде задач, когда разделение регистрируемой радиации на прямую и рассеянную не критично по точности и не является определяющим, для оценки прямой радиации можно использовать выражение (3) или его приближение (4). Такие задачи могут возникнуть при исследованиях сезонных и межгодовых вариаций приземной УФР, трендов, возможной зависимости от солнечной активности [4, 8]. Нами были оценены условия, при которых возможно применение приближения (4). В табл. 1 приведены оценки величины

Угловая высота Солнца, град	S , мВт/(м ² ·нм)		D , мВт/(м ² ·нм)		k	d		$\frac{F_g \delta(i) d(\lambda, i)}{k(i)}$	
	309 нм	344 нм	309 нм	344 нм		309 нм	344 нм	309 нм	344 нм
15 ($A=0,7$)	0	59	7	163	0,95	–	2,76	>>1	0,06
30 ($A=0,7$)	17	246	51	307	0,56	3	1,25	0,11	0,04
45 ($A=0$)	50	388	73	280	0,28	1,46	0,72	0,05	0,03
60 ($A=0$)	83	475	101	311	0,17	1,22	0,65	0,07	0,04

$F_g \delta(i) d(\lambda, i) / k(i)$ при высокой прозрачности атмосферы и ОСО, равном 300 е.Д. для различных значений угловых высот Солнца на двух длинах волн 309 и 344 нм. Из табл. 1 следует, что вклад рассеянной УФР на длине волны 344 нм может не превышать 6% в диапазоне полуденных высот Солнца 15–60°, а на длине волны 309 нм – находиться в пределах 7–11% для высот Солнца в диапазоне 30–60°, т.е. регистрируется главным образом прямая радиация. Вклад рассеянной радиации в величину $J_{\text{рег}}(\lambda, i)$ становится существенным только в коротковолновой части спектра для минимальных полуденных высот Солнца в точке наблюдения.

Полученные описанным выше способом значения УФ-радиации сопоставлялись с изменением расчетных значений прямой и рассеянной радиации согласно [6] в диапазоне угловых высот Солнца $i \sim 30$ –60°. В табл. 2 приведены значения отношений рассчитанной

Таблица 2

Длина волны, нм	Расчет		Измерение
	$S(60^\circ) / S(30^\circ)$	$D(60^\circ) / D(30^\circ)$	
309	4,9	2 ($b = 0,025$)	6
	5,5	2,1 ($b = 0,05$)	
344	1,9	1,01 ($b = 0,025$)	2,5
	2,1	1,06 ($b = 0,05$)	

(прямой и рассеянной) [6] и измеренной радиации $J_{\text{рег}}(\lambda, i) / k(i)$ при ясной погоде с наибольшей прозрачностью атмосферы для двух угловых высот Солнца 30 и 60°. Расчетные значения приведены для двух величин коэффициентов (десятичных) мутности атмосферы $b = 0,025$ и $0,05$ [6].

Из табл. 2 следует, что динамика изменений измеренной радиации в большей степени согласуется с изменением рассчитанной прямой, нежели рассеянной радиации. Это подтверждает вывод о том, что измеряется в основном прямая и небольшая часть рассеянной всей небесной полусферой радиации.

Выводы

Предложен метод выделения прямой УФ-радиации при регистрации прибором с широкой угловой апертурой.

Предложенный метод может использоваться при исследованиях долговременных изменений УФР.

Метод позволяет использовать аппаратуру без применения сложных следящих за Солнцем систем, расширить динамический диапазон прибора, так как

максимум угловой чувствительности направлен в минимум интенсивности прямой радиации при данном азимуте.

Работа выполнена при поддержке РФФИ – грант ведущих научных школ Российской Федерации № 00-15-98509.

1. Крученицкий Г.М., Звягинцев М.А., Иванова Н.С. Содержание озона над Россией и прилегающими территориями в III квартале 1999 г. // Метеорол. и гидрол. 1999. № 11. С. 118–122.
2. Крученицкий Г.М., Кадырова Т.В., Иванова Н.С., Звягинцев М.А. Общее содержание озона над Россией и прилегающими территориями в 1997 г. // Метеорол. и гидрол. 1998. № 2. С. 119–122.
3. Internet: http://toms.gsfc.nasa.gov/teacher/ozone_overhead.html
4. Михалев А.В., Черниговская М. А., Шалин А.Ю., Белецкий А.Б. Спектральные измерения ультрафиолетовой радиации в Восточной Сибири в период аномалии общего содержания озона // Метеорол. и гидрол. 2000. № 3. С. 29–35.
5. Гуцин Г.П. Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1988. 200 с.
6. Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Незваль Е.И. Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба. М.: Изд-во МГУ, 1968. 228 с.
7. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Незваль Е. И., Шиловецова О.А. Соотношение прямой и рассеянной солнечной радиации в различных областях спектра по данным

многолетних наблюдений метеорологической обсерватории МГУ // Метеорол. и гидрол. 1996. № 8. С. 53–63.
8. *Mikhalev A.V., Chernigovskaya M.A., Shalin A.Yu., Ka-*

zimirovsky E.S. Variations of the ground-level ultraviolet radiation in East Siberia // Adv. Space Res. 2001. V. 27. № 6–7. P. 1109–1114.

A.Yu. Shalin and A.V. Mikhalev. The identification of direct ultraviolet radiation in measurements with the spectrophotometer with a wide entrance aperture.

The contribution from direct and scattered ultraviolet radiation (295–345 nm) is estimated in measurements with the spectrophotometer with a fixed entrance aperture (central angle of 32°). It is shown that in a certain range of angular altitudes of the Sun and wavelengths it is possible to identify from the recorded signals the component of direct ultraviolet radiation (UVR). The error associated with the contribution of scattered UVR at 344 nm wavelength in the range of the Sun's altitudes of $15\text{--}60^\circ$ can be less than 6%, and the error at 309 nm wavelength in the range of the Sun's altitudes of $15\text{--}60^\circ$ can be as high as 7–11%. The contribution of the scattered radiation to the measured quantity becomes substantial at minimum solar altitudes in the short-wavelength part of the spectral range.

The procedure of identifying the direct UVR was applied to processing and analyzing the daily near-noon values of UVR recorded at Irkutsk during 1998–2000. The experimental data on the UVR annual variation amplitude obtained at Irkutsk (the range of solar angular altitudes is $\sim 14\text{--}60^\circ$) were compared with calculated values of annual variation amplitudes of direct and scattered UVR. It is concluded that the observed changes in recorded UVR are to a greater extent correlated with changes in direct radiation. The proposed method of identifying the direct UVR is intended for monitoring and investigation of long-lasting (such as interseasonal and interannual) variations of UVR.