

М.В. Винарский

Сравнение экспериментальных данных и расчета интенсивности рассеянной ультрафиолетовой радиации на поверхности Земли для безоблачной атмосферы

Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 25.01.2001 г.

Методом Монте-Карло моделируются потоки рассеянной ультрафиолетовой радиации на поверхности Земли. Наблюдения за потоками ультрафиолетового излучения проводились с помощью фильтрового спектрофотометра в спектральных областях *A* и *B*. Сравниваются расчет и эксперимент с целью уточнения характеристик спектрофотометра и условий наблюдения.

Введение

Исследование потоков ультрафиолетовой (УФ) радиации на поверхности Земли имеет большое значение. И хотя доля ее в общем потоке солнечной энергии, достигающей земной поверхности, составляет не более 4–5%, но из-за большой энергии кванта она обладает высокой биологической и фотохимической активностью. Значительный интерес представляют информация об основных характеристиках поля УФ-радиации и его изменчивость в зависимости от различных параметров атмосферы. К сожалению, регулярные измерения потоков ультрафиолета проводятся в малом количестве пунктов и нередко выполняются разными приборами [1]. Поэтому особенно важными являются комплексные исследования (наблюдения и расчет для различных моделей атмосферы) характеристик поля УФ-радиации. В связи с этим особенно важен выбор методики расчета потоков ультрафиолета в атмосфере, при котором наиболее полно учитывались бы не только физические факторы процесса переноса, но и все известные характеристики измерительной аппаратуры, а также имелась бы возможность подбора параметров оптической модели атмосферы, наиболее полно соответствующих условиям наблюдений.

Решение задач УФ-излучения в атмосфере осложняется тем, что распространение ультрафиолетовой радиации в земной атмосфере обладает рядом особенностей.

1. В области $\lambda < 0,32$ мкм существенную роль играет озон – оптические толщны поглощения быстро нарастают с уменьшением длины волны.

2. В рассматриваемом диапазоне длин волн ($\lambda < 0,4$ мкм) наблюдаются большие оптические толщны молекулярного и аэрозольного рассеяния.

3. Для УФ-области спектра и особенно ее коротковолновой части приход радиации в основном определяется рассеянной компонентой, в которой, в свою очередь, велика доля многократного рассеяния.

4. Для УФ-области спектра характерно малое значение величины альbedo подстилающей поверхности, особенно в летних условиях.

Очень часто численные результаты относятся к упрощенным моделям (плоская геометрия, однородность среды, сферическая или молекулярная индикатрисы и др.). При таком подходе трудно согласовать данные экспериментальных наблюдений и расчетов. Для интерпретации наблюдений в УФ-области спектра успешно применяются расчеты методом Монте-Карло [2, 3]. Основные преимущества этого метода обусловлены его способностью с помощью вероятностного моделирования процесса переноса определять с достаточно высокой точностью пространственные и спектральные распределения характеристик полей излучения атмосферы при учете ее реальной геометрии и произвольном пространственном распределении ее рассеивающих и поглощающих компонент. Разнообразие же модификаций моделирования и специальных оценок позволяет существенно повысить эффективность метода Монте-Карло, а также решать широкий круг задач оптики атмосферы [4].

В данной работе методом Монте-Карло осуществляется моделирование потоков солнечного ультрафиолетового излучения на поверхности Земли. Расчет дан для безоблачной модели атмосферы. Наблюдения за потоками УФ-радиации на поверхности Земли проводились с помощью фильтрового спектрофотометра [5] в период 1994–2000 гг. в спектральных областях *A* и *B*. Светофильтры, соответствующие этим областям, имеют максимумы пропускания при 353 и 281 нм и полуширины полос пропускания 63 и 24 нм соответственно. Приводится сравнение результатов наблюдений и расчета.

Моделирование поля рассеянного ультрафиолетового излучения

При моделировании потоков рассеянной УФ-радиации на поверхности Земли использовался метод сопряженных траекторий [2]. Выбор данного метода обусловлен тем, что он является наиболее эффективным при оценке потоков в точке фазового пространства в ос-

вещенной области атмосферы [3]. Идея метода заключается в моделировании случайных траекторий из точки наблюдения с направлениями, равномерно распределенными в телесном угле наблюдений. В каждой точке столкновения x_n фотона с частицей атмосферы вычисляется величина

$$\Psi_n = \frac{e^{-\tau(r_n)} g(-\omega^{(c)} \omega_n) q(r_n)}{2\pi} \Omega,$$

где n – порядковый номер столкновения в траектории частицы; $\tau(r_n)$ – оптическая длина отрезка от точки r_n до границы атмосферы в направлении $-\omega^{(c)}$ (направление на Солнце), ω_n – направление движения частицы перед столкновением в точке r_n ; $q(r) = \sigma_s(r)/\sigma(r)$, $\sigma(r)$ и $\sigma_s(r)$ – объемные коэффициенты ослабления и рассеяния излучения в атмосфере; $g(\mu)$ – нормированная атмосферная индикатриса рассеяния; Ω – величина телесного угла наблюдения. Тогда оценкой интегральной интенсивности многократного рассеянного солнечного излучения является величина

$$I = M\xi, \quad \xi = \sum_{n=1}^N \Psi_n, \quad \text{где } N - \text{количество столкновений частицы в траектории.}$$

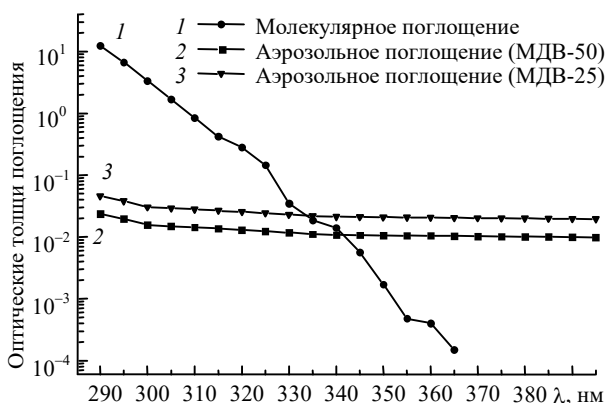
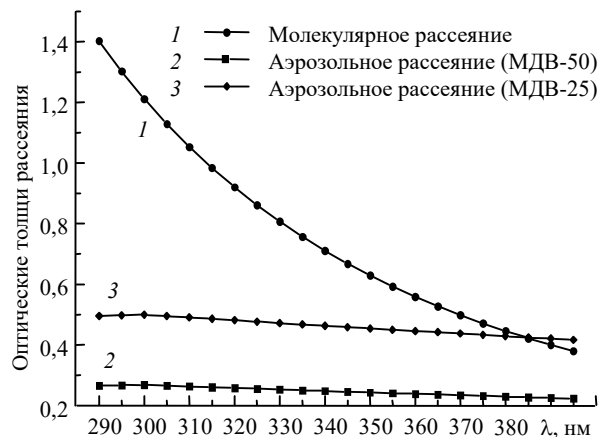


Рис. 1. Оптические параметры моделей атмосферы, используемых в расчетах

При расчете использовались 32-уровневые модели атмосферы [8], соответствующие условиям средней широты. Для этих моделей общее содержание озона равнялось летом 332 е.Д. и зимой 376 е.Д. Содержание других газов, поглощающих ультрафиолет (NO_2 , SO_2), равнялось

$5,11 \cdot 10^{15}$ и $3,4 \cdot 10^{15}$ мол/см² соответственно. Вариации оптических толщ аэрозольного поглощения и рассеяния учитывались через метеорологическую дальность видимости (МДВ) в приземном слое атмосферы. В качестве граничных значений этого параметра были взяты величины 25 и 50 км. Спектральный ход коэффициентов рассеяния и поглощения частицами аэрозоля, а также коэффициентов молекулярного поглощения и рассеяния для вертикального столба атмосферы (модель лета средних широт) указан на рис. 1. Для зимних условий значение альbedo подстилающей поверхности равнялось 0,6, закон отражения задавался «по Ламберту», т.е. $G(\mu) = 2\mu$, $0 \leq \mu \leq 1$, где μ – косинус угла между нормалью поверхности и углом отражения. При расчете также учитывались геометрические и оптические характеристики прибора и условий наблюдения.

При реализации алгоритма Монте-Карло за основу была взята программа, разработанная в ИОА СО РАН [6]. Расчет интенсивности рассеянного УФ-излучения проводился для сферической модели атмосферы. В связи с тем что излучение $\lambda < 290$ нм полностью поглощается атмосферой и не достигает поверхности Земли, значения интенсивности потоков УФ-радиации рассчитывались в спектральном диапазоне 290–395 нм с шагом 5 нм. Количество моделируемых траекторий равнялось 50 000. Относительная среднеквадратическая погрешность полученных результатов не превышала 10%.

Экспериментальные наблюдения потоков ультрафиолетового излучения

В начале 90-х гг. в Томском государственном университете был разработан спектрофотометр для измерения интегральной интенсивности УФ-излучения в спектральных областях A и B [5]. Этот прибор используется с 1994 г. для проведения регулярных наблюдений за потоками солнечной УФ-радиации на поверхности Земли в г. Томске.

Блок-схема УФ-спектрофотометра приведена на рис. 2, где цифрой 1 обозначена приемная антенна, 2 – светофильтры, 3 – фотоумножитель (ФЭУ), 4 – измерительный блок, 5 – блок питания ФЭУ. В качестве приемной антенны использовался кварцевый полусфер КУ-2, обращенный вверх выпуклой стороной. Эта антенна обеспечивает сбор излучения в телесном угле 0,586л, что соответствует плоскому углу при вершине конуса сбора $\gamma = 90^\circ$. Приемником излучения является фотоумножитель с теллорубидиевым фотокатодом ФЭУ-170. Характеристики используемых светофильтров, а также значения чувствительности ФЭУ приведены на рис. 3.

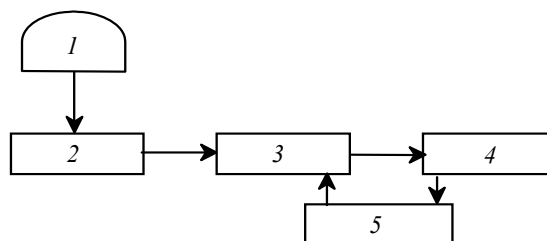


Рис. 2. Блок-схема УФ-спектрофотометра

Для измерения электрического сигнала от фотоумножителя использован измерительный цифровой блок с жидкокристаллической индикацией. На индикаторе высвечи-

вается величина падения напряжения на выходном сопротивлении схемы, выраженная в милливольтгах. Эта величина пропорциональна фототоку, который, в свою очередь, пропорционален интенсивности светового потока, упавшего на приемную антенну. Таким образом, прибор выдает значения интенсивности потоков УФ-радиации в относительных единицах. Для получения градуировочных кривых использовались синхронные измерения интенсивности солнечной УФ-радиации спектрофотометром Томского госуниверситета и ультрафиолетовым биологическим фотометром УБФ, разработанным группой Н.Д. Лазарева [7].

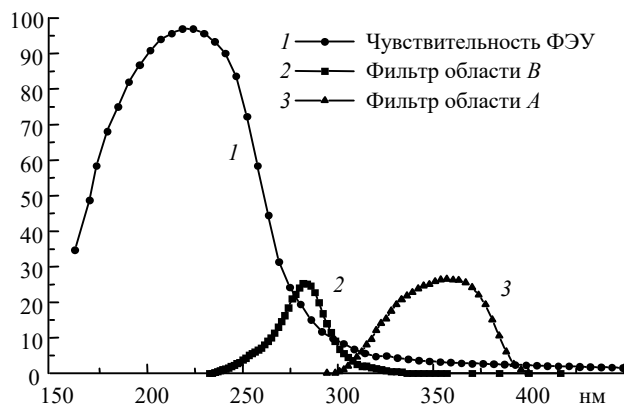


Рис. 3. Оптические характеристики спектрофотометра

Наблюдения за потоками УФ-радиации проводились следующим образом. Спектрофотометр устанавливался на горизонтальную поверхность, приемная антенна направлялась в зенит. Наблюдения проводились для высот Солнца, кратных пяти (5, 10, 15° и т.д.) в областях А и В. Для каждой из спектральных областей проводилась серия из пяти измерений с различными коэффициентами усиления ФЭУ. Каждое из полученных значений пересчитывалось с помощью градуировочных кривых в абсолютные значения ($Вт/м^2$). Результатом наблюдения считалось среднее значение по серии из пяти измерений.

Чтобы избежать влияния облачного покрова и для сглаживания годового хода ОСО (исследование влияния этих параметров на интенсивность УФ-радиации выходит за рамки данной статьи), в дальнейших исследованиях были отобраны результаты измерений, полученные в летний (с апреля по сентябрь) и зимний (с октября по март) периоды при почти безоблачной атмосфере (общая облачность составляла 0–2 балла, облачность нижнего яруса – 0 баллов). Отобранные данные наблюдений были усреднены для каждой высоты Солнца, и для каждого среднего значения были посчитаны доверительные интервалы. Значения интенсивности УФ-радиации, рассчитанные методом Монте-Карло для лета средних широт, были приведены к экспериментальным (рис. 4).

Значительные расхождения между расчетом и экспериментальными данными для углов больше 30° связаны с тем, что приемная антенна прибора не обладает четко выраженным конусом приема в 90° и имеет сложную диаграмму сбора излучения. По всей видимости, прямая радиация начинает улавливаться прибором уже при высоте Солнца 35° (что соответствует углу сбора излучения 110°). При подъеме Солнца доля прямой радиации в общем потоке УФ-излучения, который фиксирует прибор, растет, но имеет сложный и до конца не выявленный характер. По-

этому расчет проводился лишь для рассеянной компоненты, и прямая УФ-радиация не учитывалась.

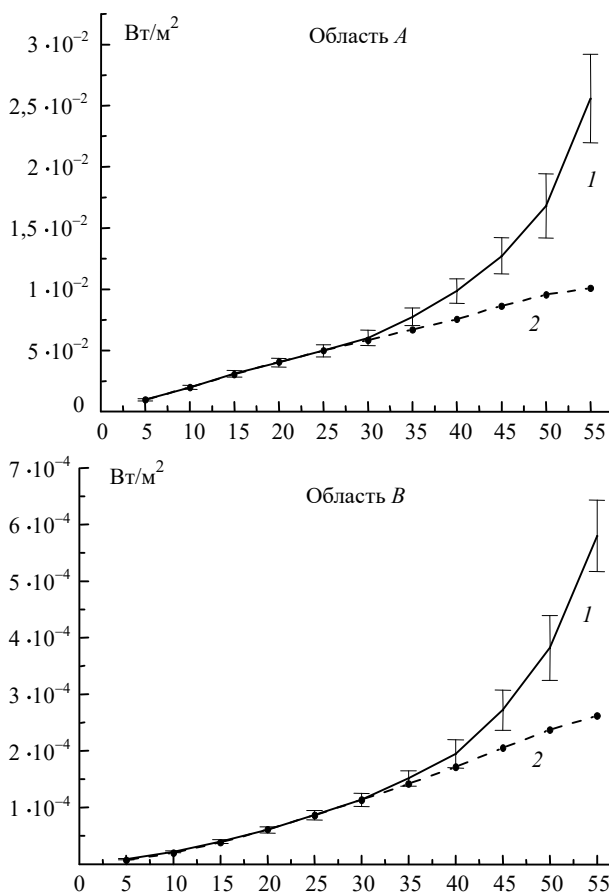


Рис. 4. Сравнение вычисленных и измеренных значений потоков УФ-излучения в областях А и В: кривая 1 – данные наблюдений; 2 – расчет методом Монте-Карло

Теоретическое значение доли прямой радиации в суммарном потоке излучения является разницей между экспериментом и расчетом. Тем не менее для комплексного исследования УФ-радиации для высот Солнца $\geq 35^\circ$ необходимо экспериментально получить функцию, описывающую зависимость доли прямой радиации в общем потоке УФ-излучения, которое регистрирует прибор. Это позволит уточнить характеристики прибора и наиболее полно учитывать их при дальнейших расчетах и сравнениях с результатами измерений.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при долговременных наблюдениях за потоками УФ-радиации с помощью данного прибора к результатам измерений только рассеянной компоненты потоков УФ-излучения относятся значения, полученные для высот Солнца менее 35°.

С целью дальнейшего уточнения характеристик прибора и условий наблюдения для высот Солнца меньше 35° были выполнены расчеты при двух значениях телесного угла захвата приемной антенны ($\gamma = 90$ и 110°) и различных оптических толщах аэрозоля (параметр МДВ). Расчет осуществлялся для летних и зимних условий, а значения, полученные методом Монте-Карло, приводились к экспериментальным (табл. 1). Результаты расчета и измерений для летних условий даны на рис. 5.

Таблица 1

Коэффициенты нормировки расчетных данных

Область	МДВ	Лето	Зима	Лето	Зима
		$\gamma = 90^\circ$		$\gamma = 110^\circ$	
A	50	0,877	0,912	1,254	1,459
	25	0,916	0,950	1,274	1,493
B	50	5,84	6,74	8,81	10,4
	25	5,88	6,75	8,68	10,3

В результате расчета абсолютные значения интенсивности УФ-радиации летом в области A оказались заниженными для угла захвата прибора 90° и завышенными для угла захвата 110° (см. табл. 1). Отсюда можно сделать вывод о том, что при расчете этот параметр нужно выбирать близким к 100° . Для зимнего периода в областях A и B наблюдаются более значительные расхождения между расчетом и экспериментом, чем летом, а также большое значение коэффициента нормировки в области A. Это говорит о более сложном поведении оптических параметров атмосферы и подстилающей поверхности в зимние месяцы.

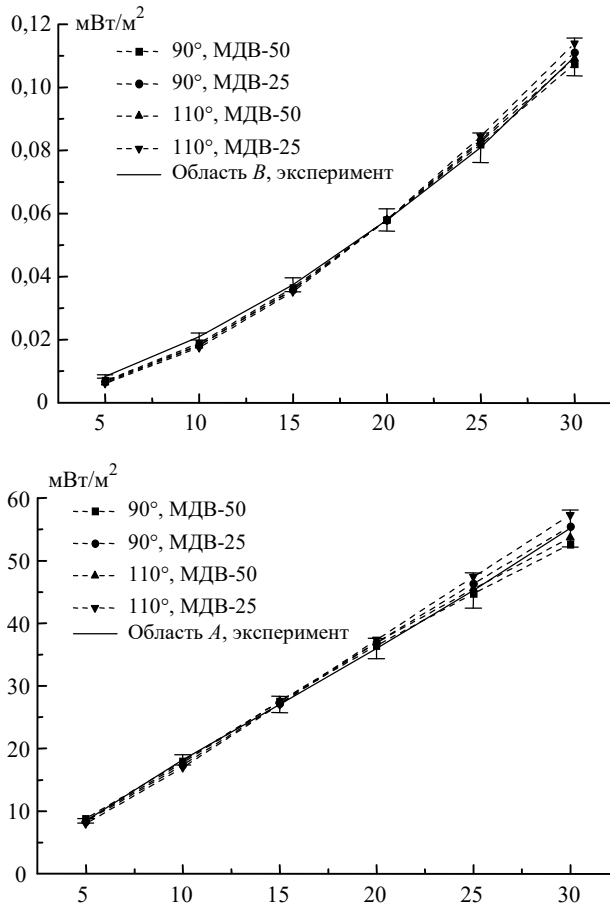


Рис. 5. Сравнение вычисленных и измеренных значений потоков УФ-излучения в областях A и B в зависимости от высоты Солнца

Для летнего периода после нормировки данные расчетов лежат в пределах доверительных интервалов измерений. Это указывает на то, что параметры используемой при расчете оптической модели атмосферы в области A адекватны условиям, в которых проводились измерения. Завышенные значения расчетных данных в области B го-

ворят о том, что при моделировании не были учтены какие-то дополнительные ослабляющие факторы в атмосфере или в оптическом канале прибора, проявляющиеся в этой спектральной области. Одним из таких факторов может служить наличие полосы поглощения атмосферным водяным паром в области 250–320 нм [9, 10]. Этот факт необходимо учитывать в дальнейшем при моделировании потоков УФ-излучения и интерпретации результатов измерений.

Анализ расчетов также показал, что варьирование при расчете величины оптической толщи аэрозольного рассеяния и поглощения в приземном слое атмосферы приводит лишь к изменению абсолютных величин интенсивности рассеянной УФ-радиации и незначительно влияет на ее поведение в зависимости от высоты Солнца. Так, при уменьшении параметра МДВ в области A наблюдается увеличение, а в области B возможно уменьшение (см. табл. 1) интенсивности потоков УФ-радиации. Это связано с тем, что при увеличении оптической толщи аэрозоля происходит увеличение количества актов рассеяния излучения в атмосфере (табл. 2). В области A поглощение мало, следовательно, идет практически чистое рассеяние. Область B характеризуется более сильным поглощением, поэтому увеличение рассеяния при больших оптических толщах может привести к ослаблению интенсивности излучения. В области B этот эффект наблюдается при малых высотах Солнца ($5 \div 20^\circ$).

Таблица 2

Доля однократного рассеяния, %, для высот Солнца $5 \div 55^\circ$ (расчет методом Монте-Карло)

Область	МДВ-25	МДВ-50
A	26÷53	33÷56
B	24÷44	30÷47

Таким образом, сравнение расчета и эксперимента позволило уточнить некоторые характеристики спектрофотометра, а также обнаружить наличие дополнительных факторов, ослабляющих УФ-излучение в области B. Использование полученных результатов при дальнейшем моделировании потоков УФ-излучения поможет не только интерпретировать результаты и условия наблюдений, но и уточнять параметры оптических моделей, используемых в расчетах.

В заключение автор выражает благодарность И.И. Ипполитову и В.В. Белову за полезные обсуждения, З.С. Теодорович – за предоставленные результаты экспериментальных наблюдений.

1. Ипполитов И.И., Матвиенко Г.Г. Мониторинг ультрафиолетового излучения. Озонометрия // Безопасность России. Экологическая диагностика: Энциклопедия. М: Машиностроение, 2000. С. 249–260.
2. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под общей ред. акад. Г.И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 216 с.
3. Назаралиев М.А. Статистическое моделирование радиационных процессов в атмосфере. Новосибирск: Наука, 1990. 227 с.
4. Зуев В.Е., Белов В.В., Веретенников В.В. Теория систем в оптике дисперсных сред. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1997. 402 с.
5. Елисейев А.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 5. С. 8–12.
6. Афонин С.В., Белов В.В., Макушкина И.Ю. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 4–5. С. 449–462.
7. Лазарев Д.Н., Беспалов Б.П., Петров Э.С. Биологический фотометр // Труды ГГО. 1966. Вып. 184.

8. Kneizys F.X., Shettle E.P., Gallery W.O. et al. Atmospheric Transmittance-Radiance: Computer Code LOWTRAN 5. Mass., USA, 1980. 245 p. (AFCR-TR-80-0067, ERP N 697).

9. Климкин В.М., Федорищев В.Н. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 2. С. 220–221.

10. Лукьяненко С.Ф., Новаковская Т.И., Потапкин И.Н. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 7. С. 706–708.

M.V. Vinarskii. Comparison of experimental and calculated data on intensity of scattered ultraviolet radiation on the Earth's surface for the cloudless atmosphere.

The modeling of scattered ultraviolet radiation flows on a surface of the Earth was carried out by the Monte Carlo method. The ultraviolet irradiance of the Earth surface was measured by the filter photometer in two spectral areas *A* and *B*. Comparison of calculation results and experimental data allow one to refine some photometer characteristics and conditions of observations.