

В.В. Гогохия, Н.Ф. Еланский, В.В. Савиных

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ СЕТЕВЫХ СПЕКТРОФОТОМЕТРОВ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ УФ-ИЗМЕРЕНИЙ

Рассматриваются численная модель переноса излучения и метод полевой калибровки спектральных приборов ультрафиолетового диапазона 0,28–0,33 мкм. При благоприятных атмосферных условиях искажения яркости, вносимые атмосферой в солнечное излучение, могут быть малы и точно учтены. При такой калибровке происходит привязка показаний прибора к яркости солнечного излучения на верхней границе атмосферы. По проведенным оценкам погрешность абсолютной энергетической калибровки спектрофотометров в диапазоне 310 нм не превышает 5% для величин спектральных яркостей больше 65 Вт/(м²·мкм). Дается краткое описание программного комплекса для расчета поля ультрафиолетовой радиации в системе «подстилающая поверхность–атмосфера» с учетом многократного рэлеевского и аэрозольного рассеяния, аэрозольного поглощения, поглощения излучения в спектральных линиях атмосферных газов с учетом отражательных характеристик поверхности. Приводятся результаты сравнения рассчитанных величин с экспериментальными.

1. Введение

Уменьшение содержания озона в атмосфере имеет важное следствие в виде увеличения УФ-освещенности земной поверхности [1]. Такое увеличение можно было бы просто рассчитать, если бы были известны пространственные особенности долговременной изменчивости озона в толще атмосферы, а также изменения всех других факторов, определяющих перенос излучения, например ослабление аэрозолями и облаками. Поскольку надежных сведений об этих процессах явно недостаточно, то для оценки трендов УФ-радиации в различных регионах используют ее прямые измерения на глобальной сети мониторинга атмосферы (GAW), состоящей из фоновых и озонметрических станций [2].

Для измерения потоков УФ-радиации используются спектрофотометры Брюера и некоторые другие приборы [3]. Они дают спектральное распределение солнечной энергии в области УФ-А (320–400 нм) и УФ-В (280–320 нм), поступающей на земную поверхность. Поскольку основной задачей сети является определение трендов в единицы процента за десятилетие, то центральным звеном системы наблюдений являются калибровка и сравнение приборов, рассредоточенных по всему земному шару и действующих в сильно различающихся условиях [1–3].

Спектрофотометры Брюера и другие аналогичные приборы для измерения потоков УФ-радиации калибруются по эталонным лампам, которые аттестуются на специальных стендах методом сравнений с государственными эталонными источниками либо аттестованными излучателями более высокого класса. Система метрологического обеспечения для количественной привязки спектральной энергетической освещенности от государственного первичного эталона к спектральным приборам измерения солнечной ультрафиолетовой радиации описана в [4–5].

В качестве образцовых средств используются, как правило, ленточные вольфрамовые лампы накаливания. Калибровка полевых приборов с помощью таких ламп не является достаточно надежной, поскольку они аттестуются только для излучения от малого участка ленты в узком апертурном угле. Для соблюдения подобия пространственно-угловых характеристик поля излучения от калибровочного источника и измеряемого прибором поля радиации на станциях наблюдения разработаны диффузные излучатели в виде неполных фотометрических сфер с встроенными в сферу галогенными лампами [6–8]. Для аттестации этих сфер-излучателей на основе сравнения с образцовыми лампами используются сложные лабораторные стенды. Суммарная погрешность приборов, откалиброванных подобным способом в лабораторных условиях для измерения освещенности, оценивается в работе [7] величиной, равной примерно 12%.

Сравнения спектрофотометров для измерения солнечной освещенности в УФ-области спектра, действующих на ряде европейских станций и регулярно калибруемых, проводились в Панораме (Греция) в 1992 и в Гармиш-Паркенкирхене (Германия) в 1993 гг. [4–5]. Отношения освещенностей, полученных этими приборами, к некоторым опорным значениям зависят от зенитного угла Солнца и лежат в основном в пределах от 0,9 до 1,1. За опорные значения принимались значения освещенностей, полученные усреднением по трем приборам, показавшим наименьшие расхождения. Такой способ оценки дает нижнюю границу погрешностей.

В настоящей статье предлагается метод полевой калибровки спектрофотометров, использующей излучение Солнца в качестве эталонного источника. При благоприятных атмосферных условиях (безоблачное небо, условия высокогорья) влияние атмосферы на освещенность земной поверхности могут

быть невелики и точно учтены. В этом случае происходит привязка показаний прибора к потоку солнечного излучения на верхней границе атмосферы. В диапазоне 290–320 нм это стабильная величина ($m < 2\%$), если исключена зависимость от орбитального движения Земли относительно Солнца.

Таким образом, погрешность калибровки по естественному источнику определяется точностью описания функции пропускания атмосферы и, в принципе, может быть заметно выше, чем при калибровке по искусственному источнику излучения. Поскольку измерения УФ-радиации на сети GAW проводятся одновременно с наблюдениями радиационно активных газов, аэрозоля и некоторых других оптических параметров атмосферы, то использование этих данных делает очень близким приближение модели к реальным условиям в данном месте и в данное время. Продолжительные сравнения позволяют еще более детально верифицировать модель.

Предложенная нами модель основана на операторном методе решения уравнения переноса. Известны и активно используются другие оптические модели атмосферы [10–13]. Все они в целом более или менее надежно описывают оптические свойства атмосферы. Мы используем операторный метод как достаточно точный и наиболее удобный для включения в существующее математическое обеспечение спектрофотометров Брюера, которые наиболее широко применяются в мировой сети мониторинга атмосферы.

2. Описание программного комплекса для расчета переноса УФ-излучения в атмосфере

Оптическая модель строится на основе решения уравнения переноса излучения в атмосфере. Мы остановили свой выбор на операторном способе решения уравнения переноса излучения еще и потому, что он удобен для реализации на персональном компьютере. Решение одномерного уравнения переноса может быть получено с любой степенью точности. В качестве вычислительного метода для точного учета оптических свойств атмосферы предлагается использовать метод, реализованный нами в виде программного комплекса «TEST». Яркость солнечного излучения будем рассчитывать в диапазоне 0,17–0,35 мкм с учетом многократного рэлеевского рассеяния, аэрозольного ослабления, поглощения излучения в спектральных линиях атмосферных газов и отражательных характеристик поверхности.

По функциональному назначению в программе можно выделить шесть программных модулей: основной модуль, задающий последовательность операций и управляющий работой остальных модулей; модули атмосферных параметров, Фурье-преобразований, интегральных и матричных операций, объединения слоев, базу географических и спектрометрических постоянных. Модульная конструкция программы допускает замену того или иного

модуля в зависимости от заданной погрешности, спектрального диапазона и т.д. По сравнению с предыдущей версией программы [16] в качестве исходных параметров добавлены балльность облачности, тип облаков, высота нижней границы облачности, толщина облачного слоя, а также разработан пользовательский интерфейс применительно к персональной вычислительной технике типа IBM в операционной среде DOS. Перейдем теперь к описанию использованной модели атмосферы.

3. Модель атмосферы

Модель атмосферы включает в себя NSL-4 параметров k , Σ , Σ_r , ΔL для каждой длины волны, где NSL – число однородных слоев атмосферы. Для каждого атмосферного слоя задаются: коэффициент поглощения, коэффициент рассеяния, коэффициент рэлеевского рассеяния, толщина атмосферного слоя. Число плоских атмосферных слоев в принятой модели атмосферы может варьироваться пользователем для достижения оптимальной точности. Фазовая функция для каждого слоя атмосферы вычисляется по формуле

$$P(\gamma) = \frac{\tau_a}{\tau_a + \tau_r} P_a(\gamma) + \frac{\tau_r}{\tau_a + \tau_r} P_r(\gamma), \quad (1)$$

где $P_a(\gamma) = R + A(1 + B \cos^2 \gamma)^m$ – аэрозольная, $P_r(\gamma) = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \gamma)$ – рэлеевская индикатрисы рассеяния; τ_r , τ_a – рэлеевская и аэрозольные оптические толщины для каждого атмосферного слоя соответственно; R , A , B , m – параметры, описывающие аэрозольную индикатрису; γ – угол рассеяния; λ – длина волны.

Для описания высотного хода аэрозольного рассеяния и поглощения остановимся на простой экспоненциальной модели. Такая модель, во-первых, часто реализуется в природных условиях [11]. Во-вторых, варьируя один параметр – высоту однородной атмосферы, – имеем возможность смоделировать целое семейство вертикальных распределений с заданной оптической толщиной. И в-третьих, как показали вычисления, направленный вниз поток излучения определяется оптической толщиной атмосферы и слабо зависит от высотного распределения аэрозоля. Зависимость коэффициентов аэрозольного поглощения и рассеяния от высоты над поверхностью Земли z соответственно описывается соотношениями:

$$K_a(\lambda, z) = K_a(\lambda, 0) \exp(-z/H);$$

$$\Sigma_a(\lambda, z) = \Sigma_a(\lambda, 0) \exp(-z/H), \quad (2)$$

где H – высота однородной аэрозольной атмосферы, которая является входным параметром программы. При расчетах зависимость коэффициентов аэрозольного рассеяния и поглощения выражается через оптическую толщину:

$$\Sigma_a(\lambda, z) = \frac{\tau(\lambda) \exp(-z/H)}{H [1 + \rho(\lambda)]}; \quad (3)$$

$$K_a(\lambda, z) = \frac{\tau(\lambda) \rho(\lambda) \exp(-z/H)}{H [1 + \rho(\lambda)]}. \quad (4)$$

Функция $\rho(\lambda)$ в соотношениях (3), (4) представляет собой отношение

$$\rho(\lambda) = K_a(\lambda, z) / \Sigma_a(\lambda, z).$$

Формула, связывающая $\rho(\lambda)$ с макроскопическими параметрами аэрозоля, следует из теории Ми:

$$\rho(\lambda) = \frac{\int x^2 [Q(x) - Q_s(x)] n(x) dx}{\int x^2 Q_s(x) n(x) dx}, \quad (5)$$

где x – приведенный радиус частиц; Q , Q_s – факторы Ми ослабления и рассеяния соответственно; $n(x)$ – плотность распределения частиц по размерам. Значения функции $\rho(\lambda)$ для нескольких типов аэрозоля затабулированы и могут изменяться в программе в интерактивном режиме. Концентрация атмосферных частиц $N(z)$ определяется по уравнению состояния идеального газа $P = NkT$, где T – температура; k – постоянная Больцмана; P – давление.

Толщина атмосферных слоев выбрана столь небольшой, что температуру в каждом из них можно представить в виде $T = T_0 - \eta z$, где $\eta = -dT/dz$ – вертикальный градиент температуры, постоянный для каждого слоя. В изотермическом слое ($\eta = 0$) давление и концентрация газовых частиц определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} N(z) &= N_0 \exp(-mgz/kT_0); \\ P(z) &= P_0 \exp(-mgz/kT_0). \end{aligned} \quad (6)$$

В изоградиентном слое имеют место соотношения:

$$\begin{aligned} N(z) &= N_0 \left(\frac{T_0 - \eta z}{T_0} \right)^{(mg/\eta k - 1)}; \\ P(z) &= P_0 \left(\frac{T_0 - \eta z}{T_0} \right)^{(mg/\eta k)}. \end{aligned} \quad (7)$$

где m – параметр, который имеет размерность массы и подбирается из условия наилучшего совпадения высотного хода температуры и давления атмосферы с моделью стандартной атмосферы; g – ускорение свободного падения. Температура и давление в каждом атмосферном слое рассчитываются от слоя к слою по значениям давления и температуры у поверхности, которые являются входными параметрами программы. Коэффициент поглощения для каждого слоя рассчитывается как сумма аэрозольного коэффициента поглощения, поглощения парами воды, кислородом, озоном и другими атмосферными

газами. Высотная зависимость плотности паров воды, озона задана в виде массива и соответствует стандартной атмосфере. Реальная плотность газа для каждого слоя получается умножением его стандартной плотности на отношение Ω/Ω_{st} , где Ω – интегральное содержание газа, являющееся входным параметром программы; Ω_{st} – интегральное содержание газа для стандартной атмосферы. Слабой зависимостью сечений поглощений озона от температуры можно пренебречь.

Описанная выше модель атмосферы предполагает обычные функции распределения оптических и метеопараметров по высоте при отсутствии сильных восходящих потоков и развитого перемешивания в погодных условиях, удобных для калибровок, например в условиях установившегося антициклона. Будем называть такую модель атмосферы «квазибалансной».

4. Учет подсветки от облаков

В описанном выше варианте модели атмосферы программа может рассчитать поле радиации в приближении плоской атмосферы. Однако такая ситуация достаточно резко реализуется. Для уменьшения погрешности определения яркости излучения на входном зрачке прибора необходимо уметь учитывать дополнительную подсветку вследствие переотражений солнечного излучения от облаков. Ниже описан примененный нами подход.

Облачность рассматривается как некий плоский атмосферный слой с параметрами поглощения и рассеяния, соответствующими выбранному типу облаков. Решение уравнения переноса излучения для такого случая находится точно так же, как и в случае безоблачной атмосферы. Поле рассеянного излучения в реальной атмосфере I ищется как комбинация двух полей в виде

$$I = (1 - b) I_0 + b I_b, \quad (8)$$

где I_0 – поле рассеянного излучения в безоблачной атмосфере; I_b – поле рассеянного излучения с плоским облачным слоем; b – относительная бальность облачности ($0 < b < 1$). Компонента ослабленного солнечного излучения представляется в двух видах. Первый вид соответствует облучению прямым солнечным излучением. Второй вид соответствует облучению в тени от облака. Предлагаемое приближение вполне оправдано в случае равномерного пространственного распределения облаков и низкой бальности $b < 0,3$. Более точные приближения должны учитывать характер распределения облаков. Если даже программа позволяла бы осуществить такие расчеты без приближений, тогда бы встала проблема определения всех входных параметров, включая высоты облаков, их взаимное расположение и т.д. В литературе отсутствуют данные систематических измерений спектральных коэффициентов поглощения и рассеяния в облаках различного типа.

Поэтому до настоящего времени сохраняется известная неопределенность при выборе констант поглощения и рассеяния в облачности. Можно использовать данные численного моделирования [14] или обратиться к базе спектроскопических постоянных Lowtran. Некоторые качественные следствия нашей модели можно подтвердить экспериментально. Экспериментально подтверждается влияние альbedo фона на интенсивность ультрафиолетового излучения вблизи поверхности [15]. Увеличение интенсивности рассеянного УФ-излучения из-за выпавшего снега составляет около 40%. Для детального сравнения требуются точные систематические и количественные наблюдения.

Перейдем теперь к результатам. Яркость излучения на входе прибора в представленном контрольном примере рассчитывалась при следующих значениях входных параметров: температура – 297 °С, давление – 1 атм, длина волны излучения – 0,3 мкм, аэрозольная оптическая толщина – 1,2, альbedo поверхности в районе наблюдательного пункта – 0,1, интегральное содержание озона – 0,3 см, высота однородной атмосферы – 1,75 км. Одновременно исследовалась погрешность градуировок прибора путем расчета яркости излучения на входе спектрометра при различных входных параметрах программы TEST. Погрешность калиброванного излучения исследовалась с помощью соотношения

$$\Delta I = \left| \frac{\partial I}{\partial p} \right| \Delta P + \left| \frac{\partial I}{\partial t} \right| \Delta T + \left| \frac{\partial I}{\partial O_z} \right| \Delta O_z + \left| \frac{\partial I}{\partial \tau} \right| \Delta \tau + \left| \frac{\partial I}{\partial A} \right| \Delta A + \left| \frac{\partial I}{\partial b} \right| \Delta b, \quad (9)$$

где ΔO_z – неопределенность содержания озона; $\Delta \tau$ – неопределенность аэрозольной оптической толщины; ΔA – неопределенность альbedo; ΔT и ΔP – неопределенности температуры и давления; Δb – неопределенность балльности облачности. Анализ показал, что наибольшую погрешность в калибровочную зависимость вносит неопределенность содержания озона. В качестве примера в табл. 1 приведены экспериментальные и рассчитанные значения освещенности УФ-излучением.

Расчеты выполнены при следующих параметрах: 1) 311 нм. Нерезонансная оптическая толщина 2,2. Альbedo фона 0,05. 2) 319 нм. Нерезонансная оптическая толщина 1,8. Альbedo фона 0,1.

При натуральных градуировках УФ-спектрометров интегральное содержание озона необходимо контролировать, либо определяя его значение с помощью калибруемого прибора, либо используя другие приборы и методы (например, данные TOMS). Как следует из численных результатов, неопределенность задания общего содержания озона является основ-

ным источником погрешностей определения падающей УФ-радиации.

Аналогично исследовалось влияние других входных параметров. Второй из них по важности – альbedo подстилающей поверхности (средний коэффициент отражения местности, окружающей спектрофотометр), отвечающий за боковую подсветку. Следующий по значимости параметр – балльность облачности. Вклад подсветки из-за рассеяния излучения в облаках может превышать по величине подсветку от подстилающей поверхности. Далее следуют: аэрозольная оптическая толщина, температура. При фиксированных выше параметрах неопределенности давления, высоты однородной атмосферы, свойств аэрозоля вносят в сумму вклад меньший, чем погрешности, связанные с неопределенностью температуры.

В табл. 2 представлена спектральная освещенность УФ-радиацией для различных земных углов Солнца. Измерения были выполнены в период проведения международных сравнений спектрофотометров 9.06.94 на аэрологической обсерватории Изана (о. Тенерифе, 28.3059° с.ш., 16.4495° з.д., 2400 м над уровнем моря). Освещенности вычислялись описанным в статье методом. Спектральная солнечная постоянная на верхней границе атмосферы бралась равной 537,2 Вт/(м²·мкм), длина волны $\lambda = 300$ нм.

Калибровка заключается в построении зависимости яркости белой ($A = 1$) ламбертовой пластинки в единицах Вт/(м²·мкм), освещенной прямым и рассеянным солнечным излучением, от показаний прибора. Градуировочная кривая нами выбрана в виде

$$Y = kX + B, \quad (10)$$

где Y – спектральная освещенность УФ-излучением, Вт/(м²·мкм); X – показания прибора, отн. ед. Исходные данные для градуировки приведены в табл. 2. Альbedo рассеивающей пластинки при расчетах освещенности принималось за единицу. Рассчитанные значения освещенности с очень хорошей точностью аппроксимируются линейной функцией. Значения градуировочных коэффициентов, определенные методом наименьших квадратов, оказались равными:

$$k = 0,0051, \quad B = 14,40.$$

Оценка дисперсии, вычисленная как среднеквадратическое отклонение экспериментальных значений освещенностей от линейной зависимости (10), составляет $\sigma = 3,41$ Вт/(м²·мкм). Если эту величину принять за оценку точности, то погрешность предлагаемого метода в диапазоне освещенностей более 65 Вт/(м²·мкм) не превышает 5%. Результаты сравнения вычисленных и измеренных значений освещенности приведены в табл. 3.

Таблица 1

Зависимость освещенности, Вт/(м²·мкм), земной поверхности УФ-радиацией от общего содержания озона

Дата измерений	8.02.97	11.03.97	15.03.97	25.11.96	11.11.96	18.11.96	9.11.96	8.10.96
Содержание озона, см	0,378	0,333	0,320	0,298	0,291	0,278	0,265	0,258
Зенитный угол Солнца, °	70,24	70,637	69,811	69,848	70,254	70,273	69,756	67,434
319 нм. Изм.	81,50	73,84	77,98	76,77	78,42	74,97	81,19	76,07
Вычислен.	80,94	87,23	89,14	92,53	93,65	95,73	97,89	99,08
311 нм. Изм.	17,79	17,87	21,34	22,45	22,82	23,15	26,97	26,05
Вычислен.	21,59	25,95	27,39	30,03	30,92	32,67	34,54	35,58

Таблица 2

Значения УФ-освещенности 9.06.1994 г. по измерениям на обсерватории Изана

Время по Гринвичу, мин	Зенитный угол Солнца, °	Число отсчетов	Спектральная освещенность, Вт/(м ² ·мкм)
536,6	55,65	1390	16,19
559,5	50,68	2543	25,65
593,0	43,34	5430	43,03
615,6	38,37	7932	55,97
653,1	30,13	12397	79,17
690,5	21,93	16878	98,83
724,1	14,74	20117	110,27
765,6	6,973	22449	128,74
787,2	5,474	22741	133,08
791,1	5,624	22931	132,64
815,4	8,77	21660	123,59
847,4	15,08	19566	109,70
903,3	27,15	13321	87,46
959,1	39,42	6669	53,16

Таблица 3

Сравнение вычисленных I_c и измеренных I_{exp} величин освещенностей, Вт/(м²·мкм); τ_r – нерезонансные оптические толщины, τ – полные оптические толщины

Длина волны, мкм	Содержание озона 0,378 см Измерения 8.02.97 Зенитный угол Солнца 59,88 °				Содержание озона 0,320 см Измерения 15.03.97 Зенитный угол Солнца 59,93 °				Альбедо
	I_{exp}	I_c	τ_r	τ	I_{exp}	I_c	τ_r	τ	
λ									A_ϕ
305,5	6,19	9,66	4,042	2,9	11,35	14,15	3,860	2,9	0,005
307,5	17,01	18,48	3,506	2,7	24,72	24,65	3,372	2,7	0,005
310	25,9	23,5	2,785	2,1	32,63	29,39	2,686	2,1	0,005
313	70,43	70,04	2,555	2,1	79,06	81,53	2,495	2,1	0,01
314,5	80,28	60,55	2,333	2,0	84,9	69,22	2,28	2,0	0,1
318	113,58	97,94	2,113	1,8	112,99	106,87	2,08	1,8	0,15
320	168,26	143,01	2,023	1,8	164,77	153,18	1,996	1,8	0,15
320,5	204,97	186,21	2,004	1,6	196,31	200,99	1,975	1,6	0,15
323	162,51	138,14	1,896	1,6	152,43	145,8	1,877	1,6	0,15
324,5	233,76	205,82	1,843	1,6	212,10	213,52	1,829	1,6	0,15
325	209,40	183,40	1,827	1,6	192,73	190,36	1,814	1,6	0,15

5. Наблюдения УФ-радиации на станции «Кисловодск»

Наблюдения ультрафиолетовой радиации в УФ-В-области и общего содержания озона проводились на Высокогорной научной станции (ВНС) «Кисловодск» ИФА РАН. Станция расположена на Северном Кавказе на плато Шаджатмаз в зоне альпийских лугов; ее координаты: 43,73° с.ш. и 42,66° в.д.; высота над уровнем моря – 2070 м. В окрестностях станции отсутствуют источники загрязнения атмосферы, ближайший курортный город Кисловодск находится в 18 км к северу. В южном направлении от станции на расстоянии 46,5 км расположена горная вершина

Эльбрус, которая входит в систему Главного Кавказского хребта. Продолжительность солнечного сияния в районе станции 2100–2200 ч в год. Количество дней в году, благоприятных для измерения УФ-радиации и общего содержания озона по прямому солнечному излучению, равно 280–310. Открытость горизонта позволяет наблюдать Солнце на восходе и заходе.

На станции «Кисловодск» ведутся регулярные измерения спектрального состава солнечной радиации в спектральной области 290–325 нм, а также ОСО на спектрофотометре Brewer MKII №043 (SCI-TEC Inc., Canada). Спектральное разрешение прибора 0,5 нм; приемным элементом в случае УФ-В-

наблюдений является размещенная под кварцевым колпачком, имеющим форму полусферы, диффузная тефлоновая пластинка, принимающая солнечное излучение. Спектрофотометр измеряет поток радиации, приходящей на горизонтальную поверхность со всей верхней полусферы. Последняя калибровка прибора проводилась в августе 1996 г. с помощью эталонной лампы и мобильного эталонного спектрофотометра Brewer № 017 Канадской службы охраны окружающей среды (AES).

На рис. 1–3 представлены потоки УФ-В-радиации (в диапазоне 295–325 нм) в условиях ясного неба при трех зенитных углах Солнца (50, 60 и 70°) и с различным общим содержанием озона. Наблюдения проводились с сентября 1996 по март 1997 г. Данные по облачности представлены находящейся рядом метеостанцией «Шаджатмаз». Они подтвержда-

ют результаты численных расчетов и показывают хорошее соответствие оптической модели атмосферы ее реальному состоянию. Поглощение озоном определяет величину УФ-потока в коротковолновой части спектра, в то время как влияние облачности распределено равномерно по всему спектру. Фактически только при облачности больше 3 поток УФ-радиации заметно отличается от его значений в безоблачных условиях (рис. 4). Ослабление излучения озоном начинает преобладать над ослаблением облаками при длинах волн короче 305–310 нм, что соответствует расчетам. В целом данная численная модель хорошо повторяет значения измеренных величин потоков УФ-радиации.

Предлагаемый метод калибровки предполагается проверить в течение продолжительного времени на станциях, входящих в систему глобального мониторинга атмосферы (GAO).

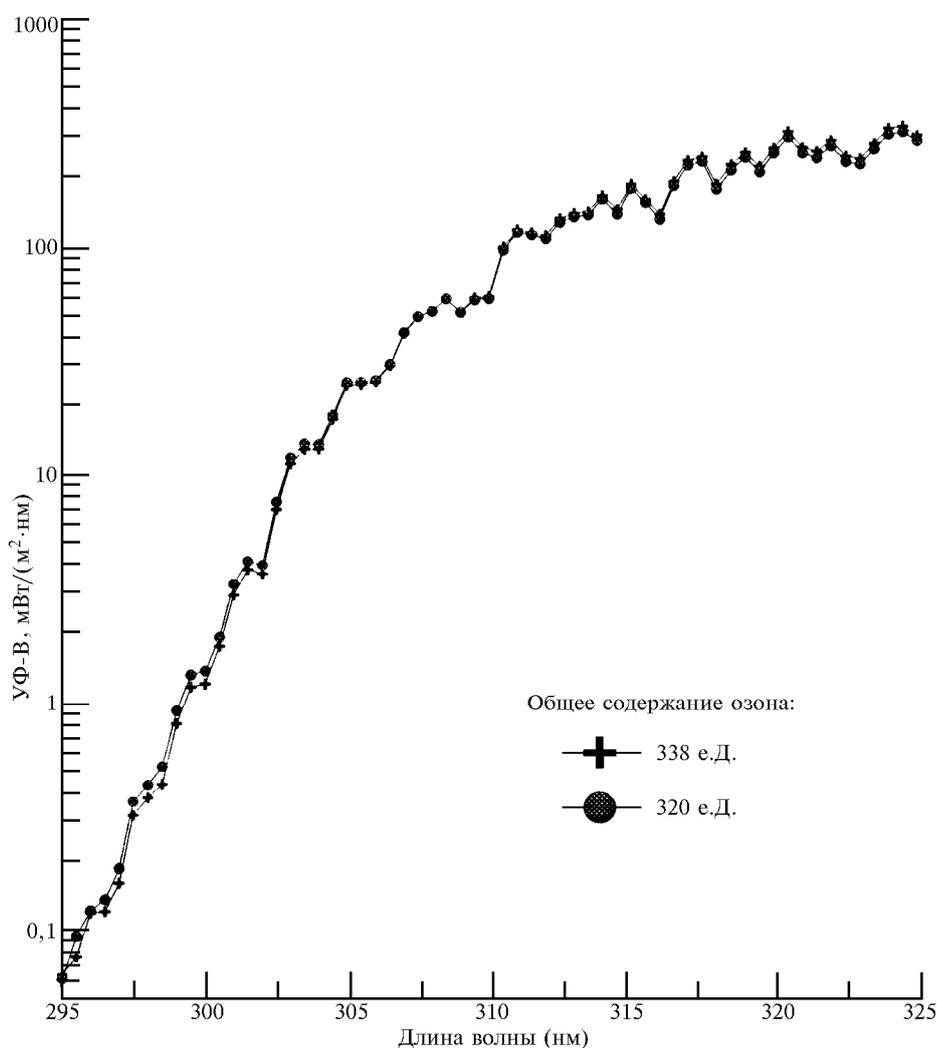


Рис. 1. Потоки УФ-В-радиации при зенитном угле Солнца 50° и различном общем содержании озона для безоблачных условий, полученные на озонном спектрофотометре Brewer N 043 (SCI-TEC Inc., Canada); станция «Кисловодск» (высота над уровнем моря 2070 м), Россия

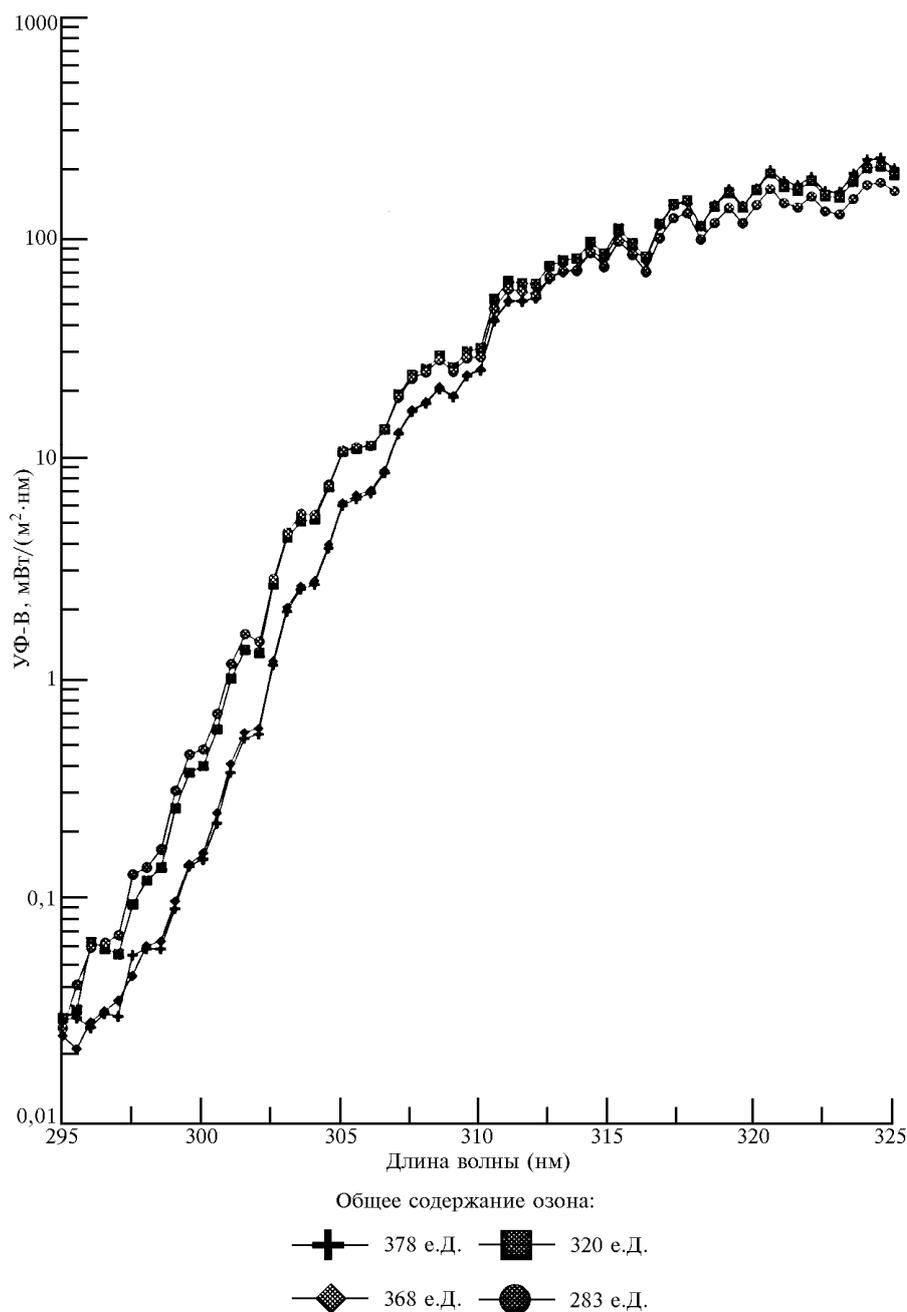


Рис. 2. Потoki УФ-В-радиации при зенитном угле Солнца 60° и различном общем содержании озона для безоблачных условий, полученные на озонном спектрофотометре Brewer N 043 (SCI-TEC Inc., Canada); станция «Кисловодск» (высота над уровнем моря 2070 м), Россия

В заключение перечислим преимущества предлагаемого метода. Не потребуются частого использования большого и дорогостоящего лабораторного комплекса калибровки приборов в режиме полевых измерений освещенности. Поле используемого для калибровки солнечного излучения по спектральным и пространственным характеристикам вполне подобно полю измеряемого излучения. Калибровка прово-

дится при различных значениях яркости и обеспечивает динамический диапазон ее изменения (до 10 раз). Наиболее подходящими условиями для проведения калибровочных измерений являются условия высокогорной обсерватории и зимнее время. При оптимальной полевой калибровке погрешность измерений освещенности УФ-излучения, по нашим оценкам, удастся снизить до величины примерно 5%.

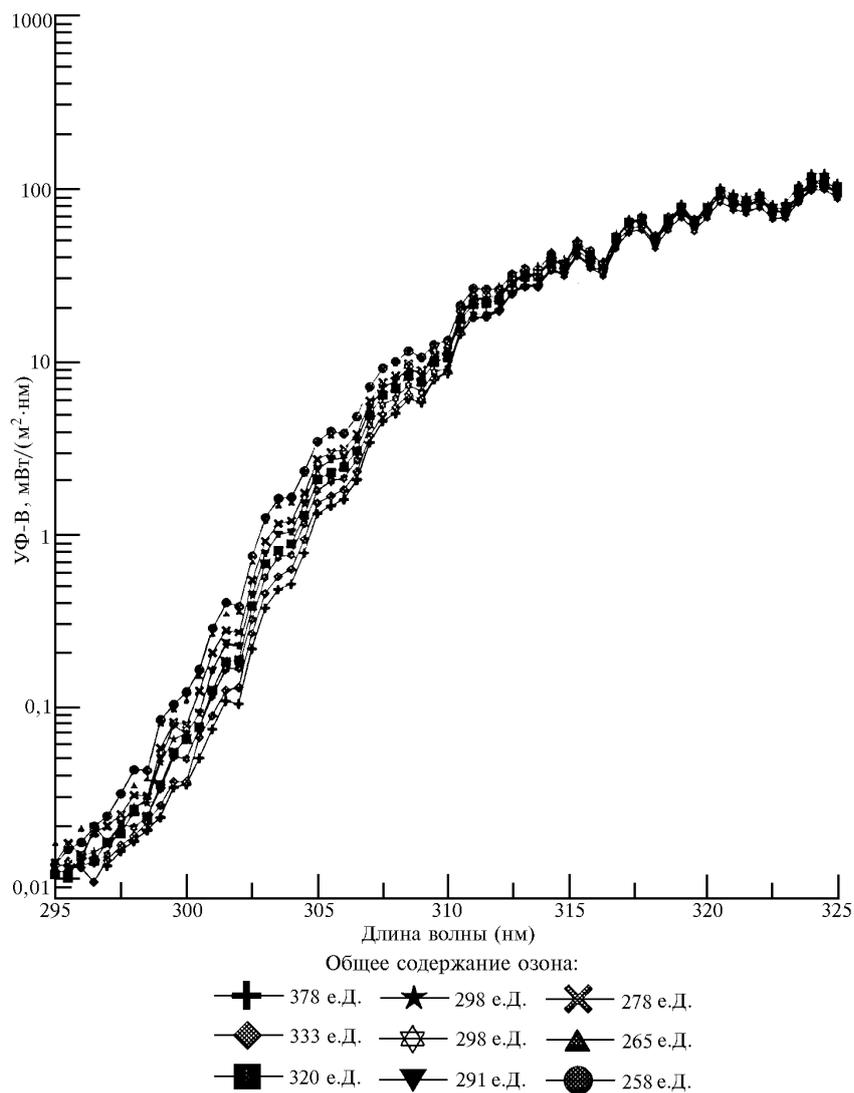


Рис. 3. Потoki УФ-В-радиации при зенитном угле Солнца 70 ° и различном общем содержании озона для безоблачных условий, полученные на озонном спектрофотометре Brewer N 043 (SCI-TEC Inc., Canada); станция «Кисловодск» (высота над уровнем моря 2070 м), Россия

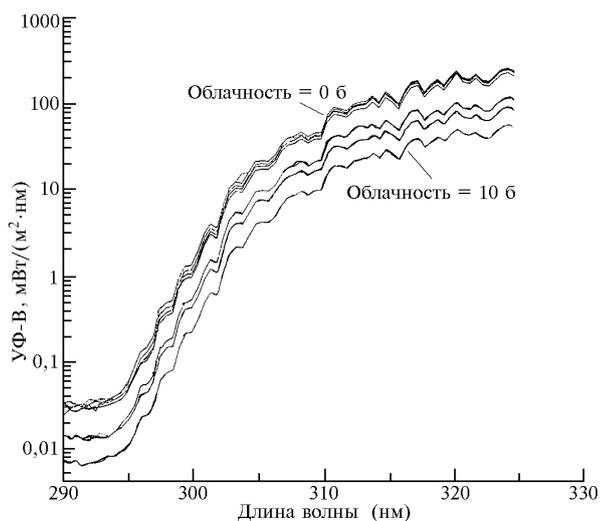


Рис. 4. Потoki УФ-В-радиации (диапазон 295–325 нм) при зенитном угле Солнца 50 ° при общем содержании озона 295–320 е.Д. и наличии облачности, полученные на озонном спектрофотометре Brewer N 043 (SCI-TEC Inc., Canada); станция «Кисловодск» (высота над уровнем моря 2070 м), Россия

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 95-05-15082).

1. *World Meteorological Organization, Report of the International Ozone Trends Panel 1988, Global Ozone Research and Monitoring Project N 18.* WMO. Geneva, 1988. 194 p.
2. *Miller J.* Global Atmosphere Watch: Along history of coordinating atmospheric ozone measurements and research // SPARC, Newsletter. 7. 1996. P. 16–17.
3. *WMO, Atmospheric Ozone Global Research and Monitoring Project // Report N 16,* Geneva, 1985.
4. *EUR 15449-Second European Intercomparison of Ultraviolet Spectroradiometers.* Luxembourg: Office for Official Publications of European Communities. 67 p. 1994. ISBN 92-826-6467-8.
5. *EUR 16153-Setting standards for European ultraviolet spectrometers.* Contract STEP – CT 900076. Final report. Luxembourg: Office for Official Publications of European Communities. 138 p. 1995. ISBN 92-826-5405-2.
6. *Торговичев В.А., Мальковский А.П., Геоджаев И.В.* Спектральные измерения солнечной ультрафиолетовой радиации прибором СУФС-М // *Метеорология и гидрология.* 1994. N 12. С. 103–110.
7. *Богданов А.А., Мальковский А.П., Торговичев В.А.* Методика и результаты исследования метрологических характеристик калибровочных излучателей, предназначенных для градуировки УФ-спектрометров в единицах СПЕО // *Фотометрия и ее метрологическое обеспечение.* М.: ВНИИОФИ, 1986. 145 с.
8. *Разработка методов и средств метрологического обеспечения измерений уровней и спектрального состава естественной ультрафиолетовой радиации // Труды Всесоюзной конференции по атмосферному озону.* М.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 23–30.
9. *Сушкевич Т.А., Стрелков С.А., Иолтуховский А.А.* Метод характеристик в задачах атмосферной оптики. М.: Наука, 1990. 296 с.
10. *Кондратьев К.Я., Смоктий О.И., Козодеров В.В.* Влияние атмосферы на исследование природных ресурсов из космоса. М.: Машиностроение, 1985. 173 с.
11. *Мак-Картни Э.* Оптика атмосферы. М.: Мир, 1979. 424 с.
12. *Krotkov N.A., Geodzhaev I.V., Chubarova N.Ye., Bushnev S.V., Khattatov V.U., Kondranin T.V.* A new database program for spectral surface UV measurements // *Atmosph. and Ocean Technology.* V. 13. N 6. 1996. P. 1291–1299.
13. *Madronich S.* The atmosphere and UV-B radiation at ground level // *Environmental UV Photobiology /* Eds. A.R. Young et al. Plenum Press. New York, 1993. P. 1–39.
14. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитных волн сферическими полидисперсными частицами / Пер. с англ. Веретенников В.В.. М.: Мир, 1971. 165 с.
15. *Chubarova N.T., Krotkov N.A., Geodzhaev I.V., Bushnev S.V., Kondranin T.V., Khattatov V.U.* // International conference on Past. Present and Future climate. Finland, Helsinki, 22–25 August, 1975. P. 381–384.
16. *Гогохия В.В.* Операторный метод расчета яркости излучения в каналах съемочных систем // *Труды ГосНИЦИПР.* 1991. Вып. 40. С. 122–130.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова,
Москва

Поступила в редакцию
27 декабря 1997 г.

V.V. Gogohia, N.F. Elansky, V.V. Savinykh. Application of Numerical Model of Radiative Transfer in Atmosphere for Calibration of Net Spectrophotometers and Interpretation of UV-Radiation Measurements.

Paper presents the method of calibration developed for the Brewer spectrophotometers and other analogue devices used at ozonometric stations round the world. Under favorable atmospheric condition (clear sky, high, altitude of station) an influence of atmospheric layer on sun radiation may be decreased and correctly taken into account on the base of proposed numerical model of radiation transfer. In this case we may correctly determine irradiance of white screen and to estimate the uncertainty caused by various factors. The calibration curve does not depend on transporting unit of radiation and is belt to sun radiation on upper border of atmosphere. Another advantage of our method is the equivalence of angular distribution for calibration and measured radiation and also possibility of calibration of different type of spectrophotometers with one natural source – sun radiation on upper level of the atmosphere. The numerical model of radiative transfer is based on matrix operator method and includes aerosol absorption and scattering, Raleigh scattering, absorption in spectral lines of atmospheric gases. Paper also presents validation of the used numerical model of radiation transfer on base of comparison of calculated and measured values. Measurement was made Kislovodsk ozonometric station. Method of error estimation of radiation field is briefly described. The accuracy of absolute calibration in spectral range is estimated as no more than 5%.