

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.521+551.510

Т.Б. Журавлева¹, А.Н. Рублев², Т.А. Удалова², Т.Ю. Чеснокова¹

**О вычислении фотосинтетически активной радиации
при оценках параметров углеродного баланса
наземных экосистем**

¹ *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

² *Институт молекулярной физики, Российский научный центр «Курчатовский институт», г. Москва*

Поступила в редакцию 4.10.2005 г.

Представлены модифицированные алгоритмы расчета спектральных потоков коротковолнового излучения методом Монте-Карло для эффективного вычисления фотосинтетически активной радиации (ФАР) в безоблачной атмосфере, сплошной и разорванной облачности. Создана база данных, предназначенная для быстрых расчетов среднемесячных значений ФАР в зависимости от географической широты, месяца и типа подстилающей поверхности на основе спутниковых данных о балле облачности. Выполнено сопоставление результатов расчетов с данными наземных измерений, полученными на BOREAS NSA (Канада).

Введение

Примерно 45% приходящего к поверхности Земли коротковолнового излучения приходится на долю фотосинтетически активной радиации (ФАР, 400–700 нм). В процессе фотосинтеза ФАР частично поглощается растительностью и является одной из ключевых характеристик накопления углерода наземными экосистемами. Вследствие этого энергетические параметры ФАР, определяемые с различным временным и пространственным усреднением, являются исходными данными практически для всех моделей переноса углерода (см., например, [1–5]). В совокупности с другими атмосферными параметрами (количество осадков, температура почвы и атмосферы и т.д.) ФАР используется также для оценки углеродного баланса лесных экосистем при помощи регрессионных моделей, основанных на прямых измерениях потоков CO₂ в различных наземных пунктах [6, 7].

Для моделирования углеродного цикла в глобальном масштабе необходимо знать уровни ФАР, их пространственную и временную изменчивость для различных районов земного шара. В течение последнего десятилетия систематические измерения ФАР вместе с другими метеорологическими параметрами проводятся в сети FLUXNET (<http://daacsti.ornl.gov/FLUXNET/fluxnet.html>), включающей несколько региональных сетей (AMERIFLUX, EUROFLUX). В России достаточно большой массив измерений фотосинтетически активной радиации накоплен в Метеорологической обсерватории МГУ [8, 9]. Однако возможности наземных измерений ФАР ограничены по своему географическому охвату. Поэтому для оценок ФАР в настоящее время широко используются

радиационные коды, входными параметрами которых являются данные спутниковых измерений атмосферных параметров – прежде всего, балла и оптической толщины облаков.

Ранее в Институте оптики атмосферы СО РАН были разработаны эффективные алгоритмы расчета спектральных потоков коротковолновой радиации методом Монте-Карло для различных атмосферных условий – безоблачной атмосферы, сплошной и разорванной облачности [10, 11]. В настоящей статье описана модификация этих алгоритмов, предназначенная для определения ФАР по спутниковым данным о балле облачности, и сопоставлены результаты расчетов с данными наземных измерений, выполненных на известном пункте сети AMERIFLUX: BOREAS NSA (Канада, провинция Манитоба, 55,9° с.ш., 98,5° з.д.).

1. Модель атмосферы

Плоскопараллельная модель атмосферы задается в виде совокупности N_{lay} горизонтально-однородных слоев, характеризующихся постоянными метеопараметрами (давление, температура), концентрацией атмосферных газов и оптическими характеристиками аэрозоля. Высота верхней границы атмосферы H_{atm}^{top} принята равной 100 км. Предполагается, что подстилающая поверхность отражает падающее излучение согласно закону Ламберта.

Аэрозольная модель

В пределах каждого j -го слоя, $j = 1, \dots, N_{lay}$, задаются коэффициент аэрозольного ослабления, альbedo однократного рассеяния и индикатриса рас-

сеяния излучения на длине волны $\lambda_0 = 550$ нм. Спектральный ход оптических характеристик и их вертикальная стратификация соответствуют модели, рекомендованной WSP [12]. Оптические характеристики аэрозоля рассчитаны для опорных значений длин волн в соответствии с теорией Ми [13]; для остальных значений λ эти характеристики получены на основе линейной интерполяции. В пределах каждого слоя задаются также коэффициенты рэлеевского рассеяния [14].

Оптическая модель облаков

Для моделирования облачности в пределах выделенного слоя используется *статистически однородная* модель облаков на основе пуассоновского потока точек на прямых, подробно описанная в [15]. Входными параметрами модели являются положение верхней H_{cl}^{top} и нижней H_{cl}^{bot} границ облачности, средний горизонтальный размер облаков D (или параметр $\gamma = H/D$, где $H = H_{cl}^{top} - H_{cl}^{bot}$ – геометрическая толщина облачного слоя), а также оптические характеристики – коэффициент ослабления облаков, вероятность выживания кванта и индикатриса рассеяния излучения. Оптические характеристики жидкокапельных облаков рассчитаны для опорного набора длин волн в предположении «широкого» распределения частиц по размерам [16]; для получения оптических характеристик на остальных необходимых в расчетах длинах волн используется линейная интерполяция.

2. Метод расчета

Интегральные (в пределах спектрального диапазона 400–700 нм) потоки восходящей ($F_{\text{ФАР}}^{\uparrow}$) и нисходящей ($F_{\text{ФАР}}^{\downarrow}$) солнечной радиации на уровне z рассчитываются на основе соотношения

$$F_{\text{ФАР}}^{\uparrow(\downarrow)}(z) = \sum_{i=1}^N F_i^{\uparrow(\downarrow)}(z), \quad F_i^{\uparrow(\downarrow)}(z) = \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} F^{\uparrow(\downarrow)}(z, \lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$i = 1, \dots, N, \quad \lambda_1 = 400 \text{ нм}, \quad \lambda_{N+1} = 700 \text{ нм},$

где N – число спектральных интервалов; $F^{\uparrow(\downarrow)}(z, \lambda)$ – спектральные потоки.

В пределах i -го спектрального интервала (λ_i, λ_{i+1}) оптические характеристики облаков и аэрозоля, а также коэффициенты рэлеевского рассеяния считались постоянными. Как отмечалось во введении, потоки $F_i^{\uparrow(\downarrow)}(z)$ вычислялись на основе алгоритмов метода Монте-Карло: в условиях ясного неба и сплошной горизонтально однородной облачности использовался метод прямого моделирования [17], а в разорванных облаках – алгоритм, предложенный в [10]. Траекторий фотонов моделировались в атмосфере независимо от газового поглощения.

Для учета селективного молекулярного поглощения в спектральном интервале $\Delta\lambda = (\lambda_i, \lambda_{i+1})$ использовались функции пропускания $T_{\Delta\lambda}(\Delta m^*)$, где Δm^* – оптическая масса поглощающих газов, нако-

пленная вдоль траектории фотона. Для определения $T_{\Delta\lambda}(\Delta m^*)$ применялась их аппроксимация в виде линейной комбинации нескольких экспонент (метод k -распределений) [11, 18]. Например, для прямой компоненты нисходящей радиации функция пропускания $T_{\Delta\lambda}(\Delta m^*)$ представлялась в виде

$$T_{\Delta\lambda}(\Delta m^*) = \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} S(\lambda) T(\Delta m^*, \lambda) d\lambda / S_{\Delta\lambda} = \sum_{l=1}^L C_l \exp\left(-m \int_0^{H_{atm}^{top}} k(g_l, z) dz\right), \quad (2)$$

$$S_{\Delta\lambda} = \int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} S(\lambda) d\lambda.$$

Здесь $S(\lambda)$ – спектральная солнечная постоянная;

$$T(\Delta m^*, \lambda) = \exp\left(-m \int_0^{H_{atm}^{top}} \kappa_{mol}(\lambda, z) dz\right)$$

– монохроматическая функция пропускания атмосферы Земли; m – оптическая масса атмосферы (в направлении на Солнце); $\kappa_{mol}(\lambda, z)$ – коэффициент молекулярного поглощения на длине волны λ и высоте z над поверхностью Земли; $k(g, z)$ – коэффициент поглощения в пространстве кумулятивных частот g ; g_l и C_l – узлы и коэффициенты гауссовских квадратур; $\sum_{l=1}^L C_l = 1$.

В наших расчетах $N = 3$, т.е. диапазон 400–700 нм был разбит на 3 равных по ширине интервала: 400–500, 500–600, 600–700 нм. Оптические характеристики облаков, аэрозоля, молекулярного рассеяния в каждом из этих интервалов выбирались равными значениям оптических характеристик на длине волны, соответствующей середине интервала: 450, 550, 650 нм. Альbedo подстилающей поверхности $A_{s,i}$ в i -м интервале рассчитывалось на основе соотношения

$$A_{s,i} = \frac{\int_{\lambda_i}^{\lambda_{i+1}} A_s(\lambda) d\lambda}{\lambda_{i+1} - \lambda_i}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Спектральные значения альbedo подстилающей поверхности $A_s(\lambda)$ взяты из модели [19].

Коэффициенты молекулярного поглощения рассчитывались заранее на основе базы данных HITRAN-2000 (<http://www.hitran.com>) и модели непрерывного поглощения CKD2.4 (<http://rtweb.aer.com>). Число гауссовских квадратур в (2) $L = 10$. Вертикальные профили температуры, давления воздуха и концентраций атмосферных газов (H_2O , O_2 , O_3) задавались в зависимости от сезона и географической зоны согласно модели LOWTRAN7 [14]. Значения солнечной постоянной на верхней границе атмосферы взяты из [20, 21].

Для проведения тестирования предлагаемого подхода к вычислению $F_{\text{ФАР}}^{\downarrow(\uparrow)}$ было выполнено сравнение вертикальных профилей потоков нисходящей и восходящей ФАР, полученных на основе описанной методики, с результатами расчетов с помощью алгоритмов, разработанных в Российском научном центре (РНЦ) «Курчатовский институт». (Последние неоднократно проверялись по данным наземных измерений интегральных солнечных потоков, например [22, 23].) Рассчитанные профили $F_{\text{ФАР}}^{\downarrow(\uparrow)}$ в условиях безоблачной атмосферы для лета умеренных широт [14] и континентальной модели аэрозоля [12] представлены в табл. 1, из которой следует, что максимальные отличия между потоками ФАР, рассчитанными двумя независимыми алгоритмами, не превышают $1,5 \text{ Вт/м}^2$.

Таблица 1

Потоки восходящей и нисходящей ФАР, Вт/м^2 , лето умеренных широт [14], континентальный аэрозоль [12], зенитный угол Солнца 60°

z , км	$F_{\text{ФАР}}^{\downarrow}(z)$		$F_{\text{ФАР}}^{\uparrow}(z)$	
	РНЦ	ИОА	РНЦ	ИОА
0,0	199,585	198,109	12,826	12,549
0,2	202,878	201,543	14,924	14,737
0,5	207,722	206,676	17,919	17,922
1,0	215,691	215,081	22,700	22,946
2,0	223,619	223,483	27,329	27,789
3,0	234,572	234,842	34,057	34,732
5,0	239,787	240,004	38,126	38,799
10,0	248,829	249,118	45,245	46,016
15,0	253,714	254,454	48,588	49,768
20,0	256,856	257,635	49,784	51,166
25,0	259,965	260,695	50,108	51,509
50,0	265,226	265,626	50,110	51,404
100,0	265,345	265,753	50,127	51,418

Учитывая, что точность расчетов РНЦ «Курчатовский институт» оценивается в $2\div 3 \text{ Вт/м}^2$, можно считать полученные различия незначительными и использовать описанный выше подход для определения фотосинтетически активной радиации.

3. Сравнение модельных расчетов и экспериментальных данных

Наиболее длительные непрерывные измерения для исследования углеродного обмена в бореальном лесу осуществлялись в рамках международного проекта BOREAS (BOReal Ecosystem-Atmosphere Study). Этот проект (http://www-eosdis.ornl.gov/BOREAS/bhs/BOREAS_Home.html) был направлен на изучение особенностей взаимодействия бореальных лесов с атмосферой и оценку их роли в глобальном углеродном цикле. В ходе проекта на территории Канады были организованы два сайта: Southern Study Area (SSA, $53,4\text{--}54,3^\circ \text{ с.ш.}$, $104,2\text{--}106,3^\circ \text{ з.д.}$) и Northern Study Area (NSA, $55,4\text{--}56,2^\circ \text{ с.ш.}$, $97,2\text{--}99,0^\circ \text{ з.д.}$). Измерениями было охвачено около полусотни параметров, характеризующих лес, почву и атмосферу. Для построения регрессионных зависимостей, связывающих потоки CO_2

с параметрами атмосферы, использовались лишь некоторые из них. В их число входил поток ФАР, измеряемый на BOREAS NSA.

Данные BOREAS NSA с марта 1994 г. по декабрь 2003 г. были взяты со соответствующего сайта сети AMERIFLUX (<http://public.ornl.gov/ameriflux/>) в виде унифицированных файлов, в которых измеряемые величины приведены с получасовым усреднением. Данные ФАР ($\text{мкмол} \cdot \text{фотон} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), с учетом пропусков, были пересчитаны в соответствующие среднемесячные величины (Вт/м^2), которые в дальнейшем непосредственно использовались в регрессиях углеродного баланса лесных экосистем.

В качестве модельной оценки среднемесячного значения ФАР по спутниковым данным принималось ее среднесуточное значение, рассчитанное на 15-й день выбранного месяца. При этом полагалось, что в течение дня балл облачности не менялся и был равен среднемесячному значению балла облачности, восстановленному по данным спутникового сканера MODIS (Modis/Terra Atmosphere Monthly Global Product, http://g0dup05u.ecs.nasa.gov/Giovanni/modis.MOD08_M3.shtml). Для примера в табл. 2 представлены значения среднемесячных баллов облачности n_0 над BOREAS NSA в течение 4 лет.

Таблица 2

Среднемесячные значения балла облачности, %, над BOREAS NSA

Месяц	Год			
	2001	2002	2003	2004
1	81	83	84	90
2	58	64	74	82
3	70	57	74	58
4	46	57	58	54
5	61	51	40	57
6	48	42	54	63
7	52	66	45	58
8	63	69	55	71
9	58	86	77	64
10	90	87	82	85
11	81	87	81	71
12	75	84	77	71

В расчетах предполагалось, что облачность является однослойной. Высота нижней границы $H_{cl}^{bot} = 2 \text{ км}$. Средний горизонтальный размер облаков D и параметр формы γ , определяющий верхнюю границу облачности H_{cl}^{top} , соответствовали данным, представленным в [24]. Коэффициент ослабления облаков σ_{cl} выбирался прямо пропорционально баллу n_0 , выраженному в процентах, т.е.

$$\sigma_{cl} = 0,12n_0. \quad (3)$$

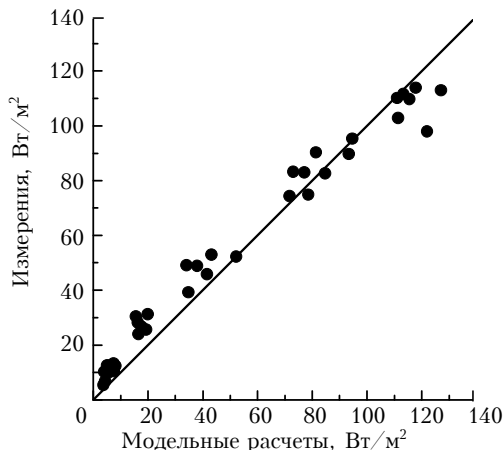
Зависимость (3) обеспечивает хорошее (среднее расхождение около 5 Вт/м^2) согласие в широком диапазоне n_0 и зенитных углов Солнца значений ФАР, полученных с помощью данного алгоритма, с расчетами РНЦ «Курчатовский институт». В этих расчетах разорванная облачность представлялась в виде случайного гауссовского поля, ограниченного снизу на некотором уровне [25]. В свою очередь гауссовская модель обеспечивает удовлетворительное согласие

расчетов с данными наземных и спутниковых радиационных измерений [26–29] при задании облачного коэффициента ослабления в виде

$$\sigma_{cl}^* = 0,3n_0. \quad (4)$$

С помощью соотношений (1) и (3) были выполнены расчеты нисходящих потоков ФАР для различных сочетаний опорных значений зенитного угла Солнца, балла облачности и альбедо подстилающей поверхности. Шаги по косинусу зенитного угла Солнца и баллу облачности выбирались равными 0,1 и 10% соответственно. Полученный расчетный массив и специально разработанное сервисное программно-математическое обеспечение составили базу данных, которая позволяет быстро рассчитывать среднемесячные значения ФАР для произвольно выбранных географических координат, месяца года и типа поверхности на основе линейной интерполяции. Рассчитанные с помощью базы данных среднемесячные значения ФАР использовались при построении регрессионной модели, предназначенной для вычисления среднемесячных значений баланса углерода NEE (Net Ecosystem Exchange) бореальных лесов Канады и Сибири [7].

На рисунке приведены измеренные и расчетные среднемесячные значения нисходящей ФАР для BOREAS NSA в 2001–2003 гг.



Измеренные и модельные среднемесячные значения нисходящей ФАР для BOREAS NSA, 2001–2003 гг.

Из рисунка видно, что в целом расчеты $F_{ФАР}^{\downarrow}(z=0)$ близки измерениям. Различия практически не оказывают влияния на точность регрессионного определения NEE бореального леса. Относительно высокие различия наблюдаются при малых значениях ФАР, соответствующих зимним месяцам, когда Солнце не поднимается высоко над горизонтом, а из-за низких температур воздуха фотосинтез у растений отсутствует.

Заключение

В настоящей статье представлены алгоритмы расчетов ФАР в ясном небе, а также в сплошной и разорванной облачности. Спектральный диапазон 400–700 нм разбивается на три равных по ширине ин-

тервала, в пределах каждого из которых спектральной изменчивостью оптических характеристик аэрозоля и облаков пренебрегается. Радиационные характеристики рассчитываются методом Монте-Карло; функция пропускания атмосферными газами аппроксимируется рядом экспонент (метод k -распределений). Коэффициенты молекулярного поглощения рассчитываются на основе спектроскопической базы данных HITRAN-2000 с учетом заданных профилей метеопараметров и концентраций атмосферных газов.

С использованием разработанного алгоритма были выполнены массовые расчеты опорных значений ФАР и создана база данных, предназначенная для быстрых расчетов среднемесячных значений ФАР в зависимости от географической широты, месяца и типа подстилающей поверхности. Хорошее согласие между модельными и измеренными среднемесячными значениями ФАР на BOREAS NSA (Канада) в 2001–2003 гг. подтверждает, что разработанный подход позволяет получать оценки ФАР с погрешностью, которая не влияет на точность регрессионных оценок потоков CO_2 в бореальных лесах.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты № 03-05-64655, 04-05-64579) и Европейского космического агентства (ESA/IFA project « CO_2 retrieval over boreal forest»).

1. Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я. Глобальные изменения окружающей среды: экиноформатика. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2002. 724 с.
2. Sitch S. The role of vegetation dynamic in the control of atmospheric CO_2 content: PhD thesis. 2002. Lund University.
3. Sitch S., Smith B., Prentice I., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J., Levis S., Licht W., Sykes M., Thonicke K., Venevski S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in LPI Dynamic Vegetation Model // Glob. Change Biol. 2003. N 9. P. 161–185.
4. Chevallard A., Kastens U., Ciais Ph., Lafont L., Heimann M. Simulation of atmospheric CO_2 over Europe and western Siberia using the regional scale model REMO // Tellus. 2002. V. 54B. N 5. P. 872–894.
5. Lafont S., Kergoat L., Dedieu G., Chevallard A., Kastens U., Kolle O. Spatial and temporal variability of land CO_2 fluxes estimated with remote sensing and analysis data over western Eurasia // Tellus. 2002. V. 54B. N 5. P. 820–833.
6. Bubier J., Gaytri B., Moore T., Roulet N., Lafleur P. Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada // Ecosystems. 2003. 6: 353–367 DOI: 10.1007/s10021-003-0125-0
7. Trishchenko A., Rublev A., Uspensky A., Udalova T., Zysina N., Buchwitz M., Rozanov V., Rozanov A., Zhuravleva T., Wang S., Trotsenko A. The potential and limitations of satellite observations for CO_2 retrievals over boreal forests // 31-st Int. Sympos. on Remote Sens. of Environment. June 20–24, 2005. St.-Peterburg, Russia. <http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/519.pdf>
8. Абакумова Г.М., Незваль Е.И., Шиловицева О.А. Влияние кучевой облачности на рассеянную и суммарную ультрафиолетовую, фотосинтетически активную и интегральную солнечную радиацию // Метеорол. и гидрол. 2002. № 7. С. 29–40.

9. Шиловецова О.А., Дьяконов К.Н., Балдина Е.А. Косвенные методы расчета суммарной фотосинтетически активной радиации по данным актинометрических и метеорологических наблюдений // Метеорол. и гидрол. 2005. № 1. С. 37–47.
10. Titov G.A., Zhuravleva T.B., Zuev V.E. Mean radiation fluxes in the near-IR spectral range: Algorithms for calculation // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102. N 2. P. 1819–1832.
11. Журавлева Т.Б., Фирсов К.М. Алгоритмы расчетов спектральных потоков солнечной радиации в облачной и безоблачной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 11. С. 903–911.
12. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. World Climate Research Programme. WCRP-112, WMO/TD, № 24. 1986. 60 p.
13. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 298 с.
14. Kneizys F.X., Robertson D.S., Abreu L.W., Acharya P., Anderson G.P., Rothman L.S., Chetwynd J.H., Seby J.E.A., Shettle E.P., Gallery W.O., Berk A., Clough S.A., Bernstein L.S. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model // Phillips Laboratory, Geophysics Directorate. Hanscom AFB, MA 01731-3010. 1996. 260 p.
15. Зюев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1996. 271 с.
16. Радиация в облачной атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 280 с.
17. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
18. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Белов В.В., Серебrenников А.Б., Пономарев Ю.Н. Ряды экспонент в расчетах переноса излучения методом Монте-Карло в пространственно неоднородных аэрозольно-газовых средах // Вычисл. технол. 2002. Т. 7. № 5. С. 77–87.
19. Hook S.J. ASTER Spectral Library: Johns Hopkins University (JHU) spectral library; Jet Propulsion Laboratory (JPL) spectral library; The United States Geological Survey (USGS-Reston) spectral library. <http://speclib.jpl.nasa.gov>
20. Kurucz T.L. Synthetic infrared spectra, Infrared Solar Physics // IAU Symp. 154 / Ed. by D.M. Rabin and J.T. Jefferies. Kluwer: Acad. Press. Norwell Massachusetts. 1992.
21. Fontenla J., White O.R., Fox P.A., Avertt E.H., Kurucz R.L. Calculation of solar irradiances. I. Synthesis of the solar spectrum // Astrophys. J. 1999. N 518. P. 480–500.
22. Чубарова Н.Е., Рублев А.Н., Троценко А.Н., Трембач В.В. Вычисление потоков солнечного излучения и сравнение с результатами наземных измерений в безоблачной атмосфере // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1999. Т. 35. № 1. С. 222–239.
23. Рублев А.Н., Трембач В.В., Чубарова Н.Е., Улюмджиева Н.Н., Горчаков Г.И. Потоки солнечного излучения в безоблачной атмосфере: расчеты и наземные измерения в различных регионах // Междунар. симп. стран СНГ «Атмосферная радиация» (МСАР-02). СПб., 2002. С. 33–34.
24. Шметтер С.М. Термодинамика и физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 288 с.
25. Рублев А.Н., Голомолзин В.В. Моделирование кучевых облаков / Препр. «Курчатовский институт» (М.). 1992. KIAE-5567/16. 12 с.
26. Rublev A., Trotsenko A., Chubarova N. et al. The use of satellite data for determination of downward solar radiation fluxes at cloudy conditions and their comparison with ground-based measurements // IRS'96: Current Problems in Atmospheric Radiation, Smith and Stamnes (Eds.). Hampton: A. Deepak Pub. Virginia, USA. 1997. P. 488–491.
27. Геогджаев И.В., Кондранин Т.В., Рублев А.Н., Чубарова Н.Е. Моделирование переноса УФ-радиации через разорванную облачность и сравнение с измерениями // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1997. Т. 33. № 5. С. 680–686.
28. Feigelson E.M., Rublev A.N., Emilenko A.S. Radiative Parameters of the Atmosphere and Clouds in the First IFA RAN Winter Radiative Experiment // Izv. RAN. Atmos. Ocean. Phys. 2001. V. 37. (Suppl. 1). P. S131–S133.
29. Trembach V.V., Rublev A.N., Udalova T.A. Mathematical simulation of surface solar radiation distribution at broken clouds conditions // IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation, W.L. Smith and Yu.M. Timofeyev (Eds.). Hampton: A. Deepak Publ. Virginia. 2001. P. 1058–1060.

T.B. Zhuravleva, A.N. Rublev, T.A. Udalova, T.Yu. Chesnokova. On calculation of photosynthetically active radiation in estimates of CO₂ balance parameters for ground ecosystems.

Modified algorithms for calculation of short-wave radiation fluxes by the Monte-Carlo method intended for efficient computation of photosynthetically active radiation (PAR) in conditions of cloudless atmosphere, as well as total and broken cloudiness are presented. The created database is intended for fast calculations of monthly mean PAR values depending on latitude, month, type of underlying surface based on satellite data on the cloud amount. The calculations are compared with BOREAS NSA (Canada) ground data.