

УДК 551.52

Эффективные параметризации поглощения биологически активной УФ-радиации атмосферным озоном

Б.А. Фомин, Г.Э. Колокутин*

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория»
141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 12.05.2017 г.

Описан метод параметризации поглощения УФ-радиации атмосферным озоном. Предложены параметризации для компьютерного моделирования тропосферных потоков УФ-А- и УФ-В-радиации, а также модифицированных потоков биологически активной УФ-радиации в медицинских приложениях (для анализа образования витамина D в организме людей и оценок риска эритемы, рака и катаракты). Параметризации дают возможность решать уравнения переноса УФ-радиации всего в одной эффективной спектральной точке для получения интегральных потоков в диапазоне 280–400 нм (с учетом спектральных факторов, характеризующих биологические эффекты). При использовании параметризаций характерные погрешности расчетов потоков в чистой и облачной тропосфере составляют ~3–5%. Использование этих параметризаций актуально для быстрых радиационных моделей, например для *on-line*-моделирования потоков УФ-радиации в медицинских приложениях. Рассмотренный метод может использоваться для повышения точности радиационных блоков моделей общей циркуляции атмосферы, в радиационно-химических моделях и т.п.

Ключевые слова: УФ-радиация, поглощение озоном, радиационные модели, медицинские приложения; UV radiation, ozone absorption, radiation models, medical applications.

Введение

Проблема моделирования биологически активной УФ-радиации для медицинских приложений [1], таких как оценок риска эритемы, меланомы (рака кожи), катаракты, образования витамина D в организме человека и тому подобное, существует давно. К настоящему моменту предложено множество способов ее решения (см. [2] и литературу к ней). Тем не менее эта проблема не потеряла актуальности. Дело в том, что зачастую требуется рассчитывать *on-line* биоактивную УФ-радиацию для множества географических точек (городов, курортов и др.) [2]. Так, для глобальных прогнозов потоков УФ-радиации на сетке $\sim 1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе требуется выполнить порядка 10^5 расчетов с учетом содержания озона, изменения зенитного угла Солнца в течение дня, облачности и т.п. в каждой точке. При этом даже один «строгий» (*line-by-line*) расчет требует довольно значительных вычислительных затрат из-за того, что в биологически активной УФ-области 280–400 нм ($25000\text{--}35714\text{ см}^{-1}$) необходимо решить $\sim 10^4$ «монохроматических» уравнений переноса радиации на сетке волновых чисел с шагом $\sim 1\text{ см}^{-1}$. Последний обусловлен характерной шириной линий в спектре излучения Солнца [3]. Расчет также осложняется необходимостью учета резкой зависимости от волнового числа излучения основных факторов,

воздействующих на перенос ультрафиолета в атмосфере: молекулярного рассеяния и поглощения радиации озоном. Это не позволяет усреднять солнечное излучение на широких спектральных интервалах без существенных потерь в точности, так как такая процедура требует достаточной однородности оптических свойств атмосферы на интервале усреднения. Поэтому, например, в 8-поточковой модели DISORT RT [4] «монохроматические» уравнения переноса излучения решаются на каждом спектральном интервале шириной 1 нм, т.е. примерно сотню раз в области биоактивного УФ (что вносит погрешность — 1% [5]).

Для медицинских приложений обычно рассчитываются нисходящие потоки УФ-радиации в приземном слое чистой атмосферы с последующим учетом облачности и аэрозоля простыми эмпирическими коэффициентами ослабления. Проблема быстрого действия таких расчетов решается с помощью параметризации самих нисходящих потоков (см. [2]). Однако подобные параметризации имеют ограниченную область применения. Так, параметризации [2] ориентированы на моделирование УФ-радиации в безоблачной атмосфере над Северной Евразией. В ряде практических задач может потребоваться более сложное трехмерное моделирование потоков УФ-радиации через произвольно ориентированную площадку [6] с учетом реального рельефа поверхности и рассеяния радиации молекулами воздуха, разорванной облачностью и аэрозолям. Поэтому основная цель данной работы — разработка параметризаций поглощения биоактивного ультрафиолета озоном для максимально

* Борис Алексеевич Фомин (b.fomin@mail.ru); Григорий Эдуардович Колокутин (gregorylost@yandex.ru).

возможного повышения быстродействия тех моделей биоактивной УФ-радиации, которые основаны на решении уравнений переноса. При этом в параметризациях учитываются молекулярное рассеяние и специфические частотные факторы воздействия УФ-радиации на человека и растения [1].

Быстродействие достигается максимально возможным сокращением числа спектральных интервалов или точек, в которых должны решаться «монокроматические» уравнения переноса радиации в модели. Как отмечалось, в DISORT RT используется ~100 спектральных точек. Это количество можно уменьшить до 5–10, если воспользоваться методом k -распределений [7], а точнее, методом k -корреляций (correlated k -distribution) [8], так как атмосфера вертикально неоднородна. В настоящей работе был использован более эффективный, чем [8], метод [9], позволивший получить параметризации, состоящие всего из одного « k -члена», т.е. свести вычисления интегральных потоков во всей спектральной области 280–400 нм (25000–35714 см⁻¹) к решению уравнения переноса радиации всего в одной эффективной спектральной точке.

1. Получение параметризаций

Метод [9] особенно прост в случае единственного « k -члена». Вначале «эталонной» (*line-by-line*) моделью, использованной в [3, 9], выполнялись расчеты интегральных потоков нисходящей радиации для нескольких «стандартных» состояний атмосферы («зимней» и «летней» в средних широтах, тропической и субарктической [10]), а также нескольких положений Солнца. Сечения поглощения УФ-радиации озоном были взяты из [11]. Дело в том, что, как показывает наш опыт, применение более новых данных по сечениям не приводит к значимым изменениям в расчетах интегральных потоков для получения параметризаций. Мы проверяли и сечения, заложенные в известную американскую модель LBLRTM (см. Wikipedia), которые также использовались в [9]. Сечения [11] являются в какой-то мере базовыми в широкополосных моделях переноса УФ-радиации (см. [3]).

Расчеты выполнялись в спектральных интервалах УФ–А (315–400 нм), УФ–Б (280–315 нм), а также в интервале 280–400 нм с учетом семи специфических спектральных факторов [1]. Эти факторы вводятся для учета спектральных чувствительностей кожи, глаза и растений в оценках риска эритемы (СIE) [12], трех типов рака (меланомы СММ1 [13], меланомы СММ2 [14], не-меланомы SCC [15]), образования витамина D в организме человека [16], катаракты [17], воздействия УФ-радиации на растения [18]. Всего девять типов расчета потоков (на этом этапе рассеяние радиации в атмосфере не учитывалось). Затем решались «обратные» задачи: находились «эффективные» высотные профили сечения озона, дающие те же нисходящие потоки при «монокроматическом» решении уравнений переноса в некой спектральной точке.

Решение основано на рассмотрении задачи о распространении луча в нерассеивающей плоскостратифицированной атмосфере, поглощение радиации в которой зависит от высоты, но не зависит от длины волны. В такой атмосфере поток будет экспоненциально уменьшаться с оптической глубиной, деленной на косинус зенитного угла луча (закон Бугера). Это дает возможность по заданному высотному профилю нисходящего потока легко определить профиль оптической глубины (по логарифму отношения потоков на заданной высоте к потоку на верхней границе атмосферы), т.е. определить «эффективные» оптические глубины горизонтальных уровней, где вычислялись интегральные нисходящие потоки. Затем предполагалось, что объемный коэффициент между уровнями линейно зависит от высоты (что достаточно хорошо выполнялось для слоев шириной 1 км) и находился профиль «эффективного» объемного коэффициента поглощения, соответствующий полученному профилю оптической глубины (начиная с верхнего уровня, где объемный коэффициент равен нулю). Наконец, искомые «эффективные» сечения получались делением «эффективных» объемных коэффициентов поглощения на плотности молекул озона (заданные в исходной атмосферной модели).

На этом этапе спектральная точка не определялась. Вместо интенсивности солнечного излучения в ней использовались интегральные потоки нисходящей радиации на верхней границе атмосферы S (Вт/м²) (свертка солнечного спектра с вышеупомянутыми частотными факторами). Примеры «эффективных» профилей для УФ–Б-радиации приведены на рис. 1. Профили $K(Z)$ (рис. 1, а), т.е. зависимости «эффективных» сечений K от высоты Z (км), показывают явные различия, определяемые исходными условиями. Но, как видно из рис. 1, б, эти различия практически пропадают, если рассматривать не высоту Z , а количество молекул вдоль солнечного луча W (мол./см²). Это и дает искомые универсальные зависимости $K(W)$. Такая универсальность вполне объясняется относительно слабой зависимостью реальных сечений поглощения озона в рассматриваемой УФ-области от температуры T и пренебрежимо малой зависимостью от давления воздуха P .

Затем для учета молекулярного рассеяния использовался метод Монте-Карло (метод мог быть и другим). Полученная «быстрая» модель представляет собой часть «эталонной» модели авторов [3, 9], где тоже используется метод Монте-Карло. Но теперь решение «монокроматического» уравнения переноса выполняется не на многих точках (как в «эталонной»), а в некоторой «эффективной» спектральной точке ν , где учет молекулярного рассеяния эквивалентен учету данного рассеяния во всей рассматриваемой спектральной области. Для ее нахождения «эталонной» моделью выполнялись серии аналогичных расчетов потоков, но уже с учетом молекулярного рассеяния. Полученные расчеты использовались для определения искомой спектральной точки путем подбора, дающего наилучшее согласие с «эталонными» расчетами.

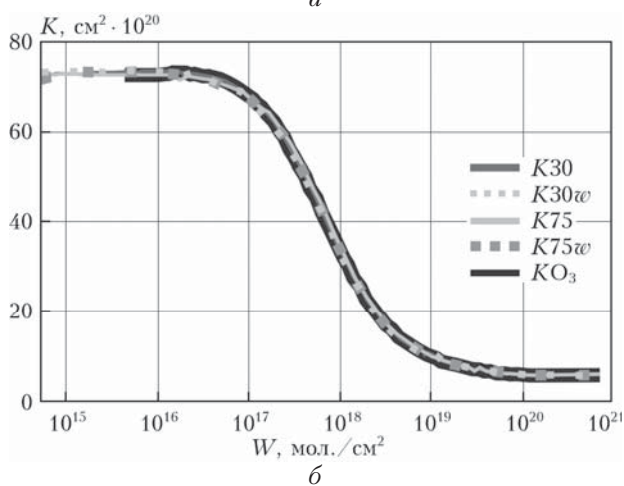
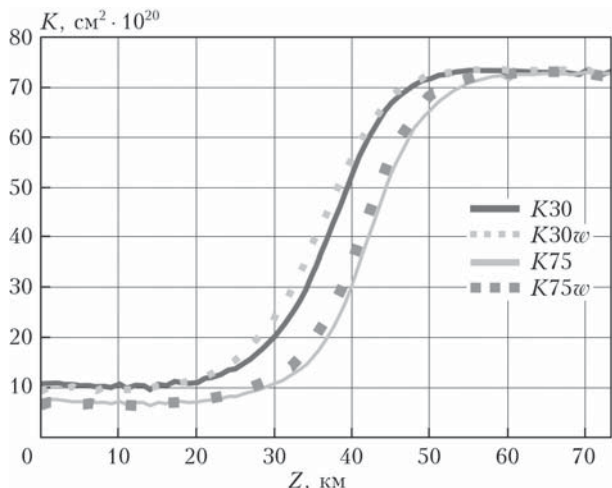


Рис. 1. Высотные профили «эффективного» сечения озона ($\text{см}^2 \cdot 10^{20}$) в зависимости от высоты для УФ–Б (а); в зависимости от количества молекул вдоль солнечного луча W (б). Расчеты с «летней» и «зимней» (w) атмосферами при зенитных углах Солнца 30 и 75° соответственно: K_{30} , K_{30w} , K_{75} , K_{75w} ; K_{O_3} – «универсальная» зависимость, впоследствии используемая в параметризации

Может возникнуть вопрос: почему «эффективные» сечения $K(W)$, полученные из рассмотрения только нисходящих потоков в гипотетической нерассеивающей атмосфере, можно использовать и для расчета и восходящих, и нисходящих интегральных потоков, да еще и с учетом рассеяния радиации в атмосфере? Дело в том, что в случае сужения спектрального интервала к произвольной точке ν получаемые таким способом сечения $K_\nu(W)$ дадут реальные «монохроматические» сечения поглощения радиации озоном $K_\nu(Z(T))$, используемые в *line-by-line*-моделях. Следовательно, если спектральный интервал будет достаточно узким, то некогерентность излучения и учет рассеяния дадут приемлемые погрешности даже при расчетах восходящих потоков. Достаточно ли узкий интервал, можно проверить сравнением с эталонными расчетами.

Полученные параметризации, т.е. «эффективные» сечения поглощения радиации озоном K ($\times 10^{20} \text{ см}^2$) в зависимости от W (мол./ см^2), спектральные точки ν (см^{-1}) и соответствующие интегральные потоки солнечной энергии S ($\text{Вт}/\text{м}^2$) на верхней границе атмосферы с учетом вышеуказанных спектральных факторов представлены в интерполяционных табл. 1 и 2.

Эти параметризации позволяют рассчитывать потоки УФ–А- и УФ–Б-радиации, а также модифицированные потоки радиации в медицинских приложениях: для оценок риска эритемы, трех видов рака, катаракты и образования витамина D в организме человека и воздействия УФ-радиации на растения. Величину S также рекомендуется использовать для проверки нормировки факторов.

2. Пояснение метода получения параметризаций и их валидация

Полученные «эффективные» сечения принципиально отличаются от сечений поглощения реальных (монохроматических) фотонов, так как лишь косвенно зависят от локальных свойств среды (T),

Таблица 1

Интерполяционная таблица эффективных сечений поглощения радиации озоном $K(\log(W))$ ($\times 10^{20}$) для расчетов различных типов биологически активной радиации

K	УФ–А	УФ–Б	Эритема (CIS)	Меланома (СММ1)	Меланома (СММ2)	Рак (SCC)	Витамин D	Катаракта	Растения
16,00	0,323	72,63	117,34	79,44	45,01	56,45	87,26	124,97	140,33
16,25	0,323	73,02	117,77	79,68	44,29	56,08	86,30	123,50	138,67
16,50	0,324	72,55	117,32	79,44	44,16	56,78	86,83	124,15	139,37
16,75	0,325	71,06	115,75	78,58	42,89	56,56	85,68	122,41	137,45
17,00	0,320	67,87	112,20	76,46	40,55	55,78	83,27	118,90	133,57
17,25	0,311	62,61	105,86	72,77	36,82	54,37	79,28	113,07	127,11
17,50	0,302	54,21	95,49	67,00	30,98	51,46	72,31	102,74	115,57
17,75	0,292	44,60	82,39	59,74	23,38	46,85	62,25	87,23	98,01
18,00	0,282	33,34	65,75	50,86	15,47	40,59	50,20	67,93	76,01
18,25	0,270	24,03	49,58	41,26	8,89	32,88	37,88	47,89	53,63
18,50	0,254	16,97	34,01	30,86	4,54	24,99	27,46	30,93	35,68
18,75	0,236	12,36	21,72	21,39	2,10	17,97	19,74	18,94	23,69
19,00	0,215	9,63	12,58	13,34	0,92	12,19	14,38	11,91	16,76
19,25	0,196	7,88	6,83	8,04	0,41	7,61	10,49	7,63	12,70
19,50	0,176	6,72	3,19	4,37	0,22	4,32	7,64	4,65	10,44
19,75	0,155	5,93	1,60	2,10	0,12	2,61	5,15	1,76	9,60
20,00	0,144	5,51	0,80	0,98	0,07	1,50	1,95	0,97	8,20

Спектральные точки ν и интегральные потоки солнечной энергии S на верхней границе атмосферы для расчетов различных типов биологически активной радиации

Параметр	УФ-А	УФ-Б	Эритема (CIS)	Меланома (СММ1)	Меланома (СММ2)	Рак (SCC)	Витамин D	Катаракта	Растения
$S, \text{Вт}/\text{м}^2$	86,9	17,85	10,22	6,20	27,63	8,57	11,46	7,96	4,71
$\nu, \text{см}^{-1}$	28072	31949	32114	32558	28498	31650	31947	31658	31819

а непосредственно зависят от пути «интегрального» фотона до заданной точки. Так, сечения поглощения «интегральных» фотонов прямой радиации на одной и той же высоте $K(Z)$, в отличие от реальных сечений, зависят от солнечного зенитного угла (см. рис. 1). Поэтому теперь объемный коэффициент поглощения на высоте Z должен определяться по $W(Z)$ (см. табл. 1) и концентрации озона вдоль исходного солнечного луча, а не из атмосферных параметров, например давления воздуха P .

Практическая применимость параметризаций подтверждается валидацией, в том числе в части вычислений восходящих потоков при альбедо поверхности, близком к 1,0 (где ожидаются наибольшие погрешности). На рис. 2, *a–e* представлены нисходящие и восходящие потоки УФ-А-радиации для модели тропической атмосферы с общим содержа-

нием озона 500 е.Д. (единиц Добсона), рассчитанные «эталонной» и «быстрой» моделями. Как видно из рисунка, предложенные параметризации обеспечивают точность расчета потоков в пределах ~3%, по крайней мере в нижнем слое до 20 км. Причем точность, как и ожидалось, возрастает с уменьшением альбедо (см. рис. 2, *a* и *e*). Результаты исследования точности показали слабую зависимость от содержания озона в пределах 250–500 е.Д. и атмосферной стратификации (например, при использовании моделей зимней атмосферы средних широт и тропической).

На рис. 2, *g–e* приведены аналогичные результаты для УФ-Б-радиации, значительно сильнее поглощаемой озоном, чем УФ-А. Предлагаемые параметризации, как видно из рисунков, вполне применимы и в этом случае. Таким образом, в области

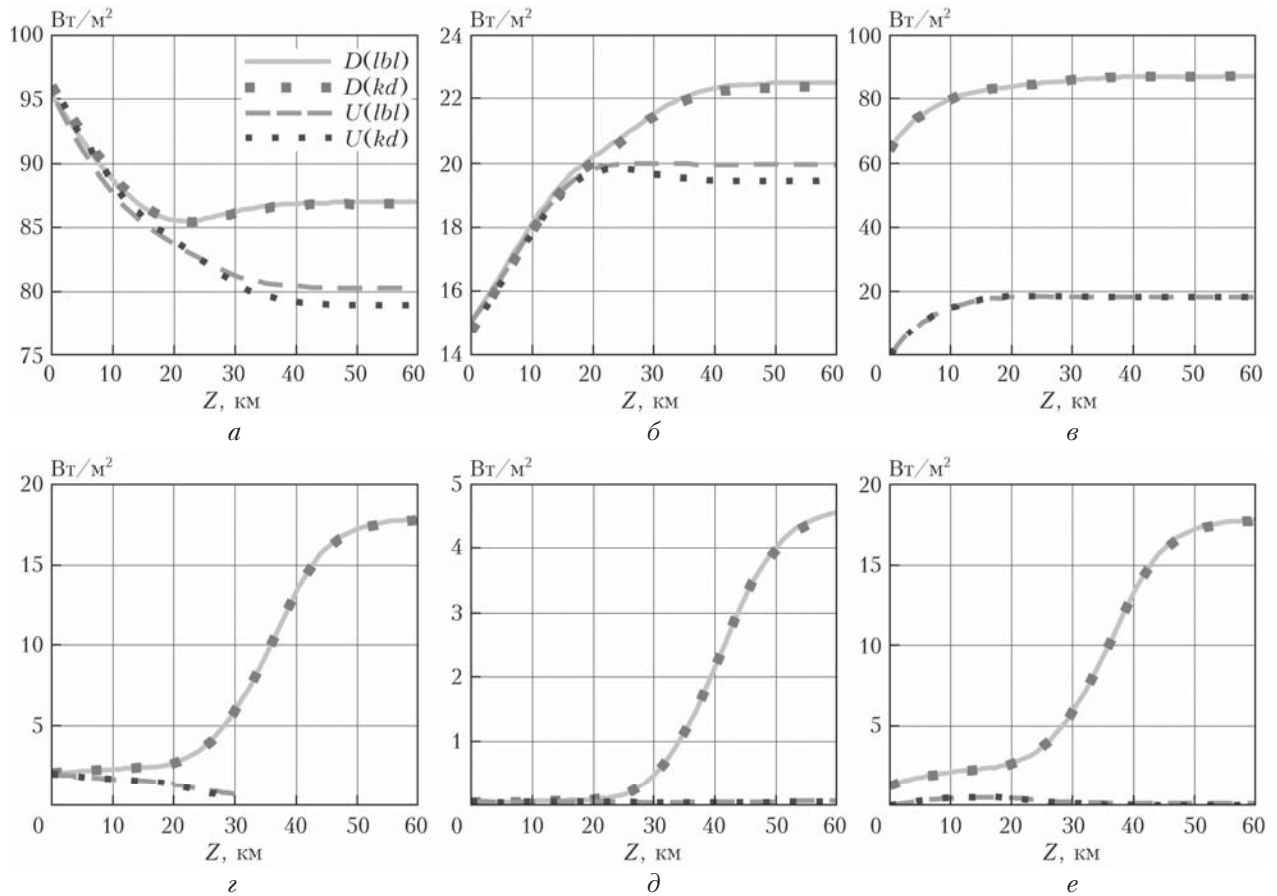


Рис. 2. Нисходящие (D) и восходящие (U) потоки УФ-А- (*a–e*) и УФ-Б-радиации (*g–d*), полученные эталонной моделью (lbl) и с использованием параметризации (kd). Использовалась модель тропической атмосферы с содержанием озона 500 е.Д.: зенитный угол Солнца $0,0^\circ$; альбедо 1,0 (*a*); $75,0^\circ$; 1,0 (*b*); $0,0^\circ$; 0,0 (*c*); $0,0^\circ$; 1,0 (*d*); $75,0^\circ$; 1,0 (*e*); $0,0^\circ$; 0,0 (*e*)

практической значимости потоков (десятичные доли Вт/м² и выше) погрешности расчетов для нижнего слоя атмосферы 0–20 км в основном лежат в пределах ~3%. Аналогичные валидационные расчеты для других условий (содержание озона 250–500 е.Д., альbedo в пределах 0,0–1,0, атмосферная модель для зимы средних широт и т.п.) подтверждают полученные точностные характеристики. Валидация выполнялась для всех типов расчетов потоков (см. табл. 1). В практически значимых случаях результаты оказались сходными: из-за применения параметризаций погрешности расчетов модифицированных потоков в чистой тропосфере составляют ~3%. Вопросы точности для случаев облачной атмосферы кратко рассматриваются в следующем разделе.

Следует подчеркнуть, что точность параметризаций может быть легко улучшена путем увеличения числа «*k*-членов» (см. [9]) – вплоть до точности эталонных расчетов. В этом случае можно применять простое разбиение рассматриваемой спектральной области на несколько интервалов. На рис. 3 демонстрируется такое увеличение точности на примере расчетов восходящих УФ–А-потоков путем разбиения УФ–А-области 25000–31746 см⁻¹ на два интервала: 25000–31500 и 31500–31746 см⁻¹. В каждом из этих интервалов поглощение озона параметризуется по вышеуказанной методике, а потоки рассчитываются независимо с последующим сложением. При этом время расчета увеличивается лишь в два раза.

3. Примеры применения параметризаций

Представляется перспективным использовать параметризацию в частности в моделях Монте-Карло. Пример применения параметризаций в Монте-Карло-моделях [3, 9] дан в табл. 3. Кроме нисходящих потоков, в ней также представлены усредненные потоки через случайно ориентированную вертикальную пластину, которая, очевидно, лучше, чем горизонтальная, имитирует облучение лица УФ-радиацией (если человек не загорает специально).

Интерес может представлять применение параметризаций в расчетах для облачной атмосферы.

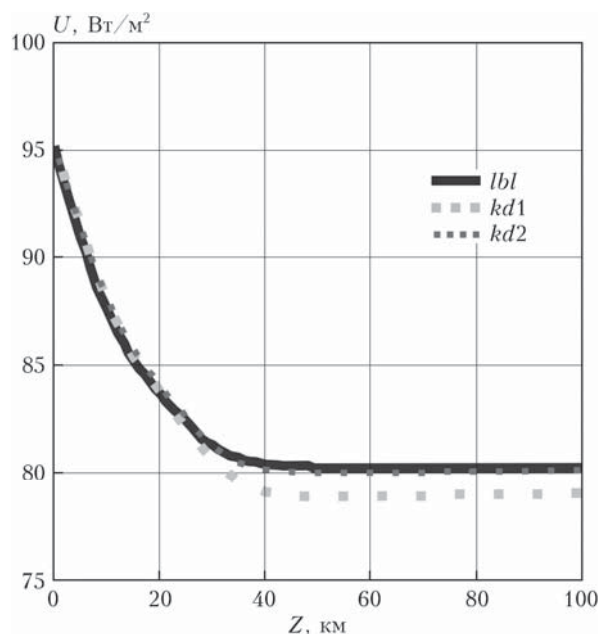


Рис. 3. Восходящие потоки УФ–А-радиации для условий рис. 2, а, рассчитанные эталонной моделью (*lbl*) и с использованием параметризаций (*kd*): *kd1* – единая параметризация для всей УФ–А-области 25000–31746 см⁻¹; *kd2* получена с разбиением области на интервалы 25000–31500 и 31500–31746 см⁻¹

В этом случае параметризация оптических свойств облачности даже проще, чем молекулярного рассеяния, так как в диапазоне 280–400 нм оптические свойства облачной среды слабо зависят от длины волны излучения. Поэтому для расчетов можно брать коэффициент и индикатрису рассеяния, например, для середины диапазона. Результаты валидации приведены в табл. 4. В расчете использовалась типичная модель сплошного капельного облака Стефенса SC-1 (см. [19]). Видно, что «эталонные» расчеты и выполненные с параметризациями совпадают в пределах ~5%, что вполне достаточно для многих приложений.

Пример практического применения расчетов в облачной атмосфере иллюстрируется табл. 5, где для облака оптической толщиной 0,0 (чистая атмосфера), 10,0 и 50,0 рассчитывается индекс УФ-радиации

Таблица 3

Потоки УФ-радиации у земной поверхности (мВт/м²): нисходящие и через случайно ориентированную вертикальную пластину (первое и второе числа соответственно). Модель чистой «тропической атмосферы», альbedo поверхности 0,1, зенитные углы Солнца 0 и 60°, содержание озона 250 и 500 е.Д.

	0°, 250 е.Д.		0°, 500 е.Д.		60°, 250 е.Д.		60°, 500 е.Д.	
Эритема*	15,7	4,1	6,6	1,7	2,6	1,4	1,1	0,6
Меланома (СММ1)	363	97,3	143	38,0	55,6	30,8	20,1	11,5
Меланома (СММ2)	12400	2790	11600	2630	4710	2930	4470	2790
Рак (SCC)	844	215	363	90,8	142	81,1	56,1	31,9
Витамин D	776	200	285	71,2	112	62,9	29,1	16,1
Катаракта	346	87,8	151	37,7	59,3	33,7	22,7	12,9

* Эритемная радиация дана в УФ-индексах.

Эталонные (первое число) и с помощью параметризаций (второе число) расчеты нисходящих и восходящих потоков ($\text{Вт}/\text{м}^2$) УФ–А, УФ–Б и эритемной радиации на верхней границе облака ($H = 3,0$ км), в середине ($H = 2,5$ км) и на нижней границе облака ($H = 2,0$ км) оптической толщиной 50,0. Модель атмосферы «зима средних широт», альbedo поверхности 0,8 (снег), модель облака SC-1 (Стефенса), зенитный угол Солнца 60°

H , км	УФ–А		УФ–Б		Эритема	
	нисходящий	восходящий	нисходящий	восходящий	нисходящий	восходящий
3,0	39,2/39,2	36,1/35,9	0,86/0,84	0,78/0,76	0,108/0,104	0,099/0,093
2,5	25,6/25,2	22,5/21,9	0,57/0,56	0,49/0,49	0,071/0,068	0,062/0,058
2,0	15,9/16,5	12,8/13,3	0,34/0,32	0,27/0,25	0,042/0,044	0,033/0,034

Таблица 5

Индексы (эритемной) УФ-радиации в безоблачных условиях и под облаками ($H = 2,0$ км).
Остальные условия – как в расчетах для табл. 4

Оптическая толщина	0,0	10,0	50,0
Нисходящий поток	3,8	2,9	1,7
Вертикальная пластина	3,7	2,6	1,6
Максимальный загар	4,9	2,9	1,7

как для нисходящего потока, так и для случайно ориентированной вертикальной пластины и пластины, перпендикулярной исходному солнечному лучу (максимальный загар). Подобные расчеты могут представлять интерес, например, для посетителей горнолыжных курортов.

Заключение

Предложены параметризации для компьютерного моделирования тропосферных потоков УФ–А и УФ–Б-радиации, а также модифицированных потоков биологически активной УФ-радиации в медицинских приложениях: для анализа образования витамина D в организме людей и оценок риска эритемы, трех типов рака и катаракты. Они дают возможность полностью избежать затрат компьютерного времени на учет спектральной зависимости оптических свойств атмосферы (поглощения озона и молекулярного рассеяния) в любых моделях переноса биоактивной УФ-радиации. В частности, они перспективны для использования в гибких Монте-Карло-моделях для моделирования УФ-радиации в условиях облачности, сложного рельефа и т.п. (как нисходящих/восходящих потоков, так и параметров, представляющих интерес для медицинских приложений). При использовании параметризаций характерные погрешности расчетов потоков составляют ~3–5%. Но эта точность может быть легко улучшена модификацией параметризаций за счет незначительного увеличения компьютерного времени. Следует отметить, что сам метод разработки параметризаций весьма актуален для ускорения и увеличения точности радиационных блоков моделей: общей циркуляции атмосферы, радиационно-химических и используемых в дистанционном зондировании атмосферы.

Работа поддержана грантами РФФИ № 15-01-00783 и 17-01-0020.

- Juzeniene A., Brekke P., Dahlback A., Andersson-Engels S., Reichrath J., Moan K., Holick M.F., Grant W., Moan J. Solar radiation and human health // Rep. Prog. Phys. 2011. V. 74, N 6. P. 1–56.
- Chubarova N., Zhdanova Y., Nezval Y. A new parameterization of the UV irradiance altitude dependence for clear-sky conditions and its application in the on-line UV tool over Northern Eurasia // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. P. 11867–11881. DOI: 10.5194/acp-16-11867-2016.
- Sukhodolov T., Rozanov E., Ball W., Bais A., Tourpali K., Shapiro A., Telford P., Smyshlyayev S., Fomin B., Sander R., Bossay S., Bekki S., Marchand M., Chipperfield M., Dhomse S., Haigh J., Peter T., Schmutz W. Evaluation of the simulated photolysis rates and their response to solar irradiance variability // J. Geophys. Res. Atmos. D. 2016. V. 121, N 10. P. 6066–6084.
- Madronich S., Flocke S. Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the Earth's // Solar Ultraviolet Radiation–Modeling, Measurements and Effects surface / Ed. by C.S. Zerefos, A.F. Bais. Springer, 1997. V. 52. P. 23–48.
- Liou K.N. An Introduction to Atmospheric Radiation. V. 84. Boston: Academic Press, 2002. 2nd ed. 583 p.
- Hess M., Koepke P. Modelling UV irradiance on arbitrary oriented surfaces: Effect of sky obstructions // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8. P. 3583–3591.
- Ambartsumian V. The effect of the absorption lines on the radiative equilibrium of the outer layers of the stars // Publ. Obs. Astron. Univ. Leningrad, 1936. V. 6. P. 7–18.
- Lacis A.A., Oinas V. A description of the correlated k -distribution method for modeling nongray gaseous absorption, thermal emission, and multiple scattering in vertically inhomogeneous atmospheres // J. Geophys. Res. D. 1991. V. 96, N 5. P. 9027–9063.
- Fomin B.A., Correa M.P. A k -distribution technique for radiative transfer simulation in inhomogeneous atmosphere: 2. FKDM, fast k -distribution model for the short-wave // J. Geophys. Res. D. 2005. V. 110, N 2. DOI: 10.1029/2004JD005163.
- McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A., Voltz F.E., Garing J.S. Optical properties of the atmosphere. Air Force Cambridge Research Laboratories, 1971. 108 p.
- Molina L.T., Molina M.J. Absolute absorption cross sections of ozone in the 185- to 350-nm wavelength range // J. Geophys. Res. D. 1986. V. 91, N 13. P. 14501–14508.
- Erythema reference action spectrum and standard erythema dose. Joint ISO/CIE Standard. ISO 17166:1999/CIE S007-1998.
- Sterenberg H.J.C.M., Thomsen C.M., Jacques S.L., Motamedi M. In vivo autofluorescence of an unpigmented melanoma in mice. Correlation of spectroscopic proper-

- ties to microscopic structure // *Melanoma Res.* 1995. V. 5, N 4. P. 211–216.
14. *Setlow R.B., Grist E., Thompson K., Woodhead A.D.* Wavelength effective in induction of malignant melanoma // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1993. V. 90, N 14. P. 6666–6670.
 15. *de Gruijl F.R., Sterenborg H.J., Forbes P.D., Davies R.E., Cole C., Kelfkens G., van Weelden H., Slaper H., van der Leun J.C.* Wavelength dependence of skin cancer induction by ultraviolet irradiation of albino hairless mice // *Cancer Res.* 1993. V. 53, N 1. P. 53–60.
 16. *Boulion R., Eisman J., Garabedian M., Holick M., Kleinschmidt J., Suda T., Terentskaya I., Webb A.* Action spectrum for production of previtamin D₃ in human skin // *Technical Report 174.* Vienna: CIE, 2006. 16 p.
 17. *Oriowo O.M., Cullen A.P., Chou B.R., Sivak J.G.* Action spectrum and recovery for in vitro UV-induced cataract using whole lenses // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2001. V. 42. P. 2596–2602.
 18. *Daubeny C.* On the action of light upon plants, and of plants upon the atmosphere // *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.* 1836. V. 126. P. 149–175.
 19. *Fomin B.A., Mazin I.P.* Model for an investigation of radiative transfer in cloudy atmosphere // *Atmos. Res.* 1998. V. 47–48. P. 127–153.

B.A. Fomin, G.E. Kolokutin. Effective parameterizations of the atmospheric ozone absorption of biologically active UV radiation.

A method for parameterizations of the absorption of UV radiation by atmospheric ozone is described. Parameterizations are proposed for computer modeling of tropospheric fluxes of UV–A and UV–B radiation and modified fluxes of biologically active UV radiation in medical applications (for the analysis of vitamin D formation and risk of erythema, cancer, and cataracts). The parameterizations allow solution of the UV radiation transfer equations at the only effective spectral point to obtain integral fluxes in the 280–400 nm range (taking into account the spectral factors characterizing biological effects). When using the parameterizations, the characteristic errors in the calculations of the fluxes in the clear and cloudy troposphere are ~3–5%. The use of these parameterizations is relevant for fast radiation models, for example for on-line modeling of UV radiation fluxes for medical purposes. This method can be used to improve the accuracy of radiation codes in general atmospheric circulation models, radiation-chemical models, etc.