

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.521.17

## Исследование взаимосвязи ультрафиолетовой радиации с метеорологическими факторами и замутнением атмосферы. Часть I. Роль общего содержания озона, облачности и аэрозольной оптической толщи

Б.Д. Белан, Г.А. Ивлев, Т.К. Складнева\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 26.03.2020 г.

Анализируется взаимосвязь суточного поступления УФ–Б-радиации и ряда факторов, определяющих поглощение УФ-радиации в атмосфере (ОСО, балл облачности, АОТ). Для этого используются однородный ряд измерений УФ–Б-радиации на TOR-станции ИОА СО РАН 2003–2016 гг., спутниковые данные по ОСО, данные по АОТ сети AERONET и данные по баллу облачности с метеоплощадки ИМКЭС СО РАН. Получены уравнения регрессии приращения суточного поступления УФ–Б-радиации в зависимости от приращения ОСО при разных условиях облачности и прозрачности атмосферы.

*Ключевые слова:* атмосфера, ультрафиолетовая радиация, общее содержание озона, облачность, вариации; *atmosphere, ultraviolet radiation, total ozone content, cloudiness, variations.*

### Введение

Зафиксированное Международной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) глобальное потепление требует уточнения его механизма. Причину роста температуры воздуха МГЭИК связывает с изменением радиационного баланса Земли вследствие резкого увеличения в индустриальную эпоху концентрации парниковых газов, задерживающих тепловое инфракрасное излучение у ее поверхности. При этом многолетнее изменение интегрального потока приходящей солнечной радиации составляет всего ~0,1% [1, 2]. Радиационный же баланс Земли увеличился за последние годы, по оценкам [3, 4], от 0,5 до 1,0 Вт/м<sup>2</sup>. В [5] дана более точная величина  $0,6 \pm 0,4$  Вт/м<sup>2</sup>. Несмотря на постоянство интегрального потока приходящей солнечной радиации на верхней границе атмосферы (солнечной постоянной), изменения потока в ультрафиолетовой области солнечного спектра могут достигать десятков процентов [6–9]. Хотя на ее долю приходится лишь несколько процентов от всего потока солнечного излучения, эта часть спектра, будучи биологически и фотохимически активной, может влиять на живые объекты, находящиеся на Земле, а также на состав тропосферы [10]. Поэтому в мире ведутся интенсивные исследования динамики поступления ультрафиолетовой солнечной радиации (УФ-ра-

диации) к земной поверхности и оценивается ее роль в атмосферных процессах [11–15].

Анализ многолетней изменчивости УФ-радиации показал, что в 1979–2008 гг. наблюдался ее глобальный рост. При этом в Южном полушарии зональный и среднегодовой рост УФ-радиации происходил значительно быстрее, чем в Северном. Так, для безоблачных условий на широте 50° ю.ш. среднезональные изменения радиации на длине волны 305 нм составили 23%, а на 50° с.ш. – всего 9% [16]. В то же время исследования многолетней изменчивости УФ-радиации на длинах волн  $\lambda = 305$  нм и  $\lambda = 325$  нм на 12 станциях, расположенных в Канаде, Европе и Японии, в течение 1990–2011 гг. выявили тенденцию снижения поступления УФ-радиации [17]. При этом отмечается, что период 1995–2006 гг. характеризуется увеличением УФ-радиации на фоне роста общего содержания озона (ОСО) и снижения тропосферного аэрозоля (рост УФ-радиации 0,94% в год на  $\lambda = 305$  нм и 0,88% в год на  $\lambda = 325$  нм), а в 2006–2011 гг. отмечено замедление роста УФ-радиации.

К основным факторам, влияющим на поступление УФ-радиации, можно отнести облачность, альбедо подстилающей поверхности, атмосферный аэрозоль, озон и некоторые другие малые газовые примеси. В коротковолновой части спектра УФ-радиации существенно увеличивается роль ОСО [18]. Многочисленные исследования показали, что влияние каждого из этих факторов зависит от физико-географических и климатических особенностей региона, при этом на разных участках спектра оно

\* Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru).

различно. Так, вариации среднемесячных значений УФ-радиации на  $\lambda = 305$  нм исключительно за счет изменений ОСО могут превышать 50%, а за счет изменения облачности в среднем достигают 35% [19].

Там же отмечается, что кратковременная изменчивость УФ-радиации на  $\lambda = 305$  нм из-за изменений ОСО может составлять более 200% (в среднем более 50%). Облака могут вызывать изменчивость 150% и более (в среднем 35%). Максимальная внутримесячная изменчивость, вызванная альбедо, составляет 32% в апреле (в среднем 6%) и 12–15% в летние месяцы (в среднем 3%). Летом и осенью на изменчивость УФ-излучения сильно влияют ОСО и облачность. Зимой и весной основное воздействие оказывает ОСО.

Общепринятым считается выделение в УФ-радиации, приходящей к поверхности Земли, спектральных областей Б (280–315 нм) и А (315–400 нм), однако изменения радиации в области Б и в коротковолновой части области А (315–325 нм), достигающей поверхности Земли, зависят от изменений количества озона, аэрозоля и облачности. Изменения аэрозоля и облачности также влияют на область А (315–400 нм) [16]. В силу схожести отклика на вышеуказанные факторы спектральных областей Б и А в дальнейшем под спектральной областью УФ-радиации Б мы будем подразумевать диапазон длин волн (280–320 нм), для которого будем применять обозначение УФ–Б.

Изменение концентрации стратосферного озона в спокойных условиях приводит к вариациям интенсивности УФ–Б-радиации у поверхности Земли на 5–25% [20, 21]. В случае возникновения стратосферных озоновых депрессий, или так называемых озоновых «дыр» [22], интенсивность УФ–Б-радиации может возрасти у поверхности Земли до 40% [23].

Не меньшее воздействие на приходящий поток УФ–Б-радиации оказывает облачность. Так, по данным [24], при десятибалльной облачности ослабление УФ–Б-радиации составляет в среднем  $75 \pm 10\%$ .

Что касается атмосферного аэрозоля, в безоблачных условиях над фоновыми районами его вклад в поглощение УФ–Б-радиации небольшой – до 10% [25, 26]. Ситуация резко изменяется при увеличении концентрации аэрозольных частиц. Так, например, при поступлении на территорию Испании воздушных масс из Сахары, обогащенных аэрозолями, аэрозольная оптическая толщина (АОТ) увеличилась до 1,76, а ослабление излучения на  $\lambda = 320$  нм достигло 50% [27]. Исследования в Пекине показали, что в условиях сильного загрязнения при видимости менее 2500 м поглощение УФ-радиации может достигать 50% [28]. Для сравнения: в Москве летом 2010 г. в период самого сильного задымления от пожаров максимальные потери суммарной радиации (300–4500 нм) составили 64%, УФ-радиации (300–380 нм) – 91% при  $АОТ_{500} = 6,4$  [29].

Существенный вклад в вариации интенсивности УФ–Б-радиации вносит альбедо подстилающей поверхности. Отраженная радиация рассеивается

на молекулах воздуха и частицах аэрозоля по разным направлениям, в том числе и в обратном, приводя к увеличению регистрируемой УФ–Б-радиации. В период снежного покрова, по сравнению с бесснежным, усиление интегральной радиации составляет в среднем 4,5% [30], а в ультрафиолетовой области спектра оно еще больше – до 22% [31].

Несмотря на большое количество исследований, пространственная и временная изменчивость, величина и направление изменений приземной УФ–Б-радиации остаются недостаточно изученными. Поэтому корректные измерения спектральной интенсивности УФ–Б-радиации и основных факторов, определяющих ее уровень на поверхности Земли, имеют большое значение для лучшего понимания и более точного моделирования взаимосвязей между УФ–Б-излучением, озоном, аэрозолями и облачностью.

Первая станция мониторинга атмосферных параметров в приземном слое атмосферы в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА СО РАН) (ТОР-станция) создана в рамках международного проекта по исследованию тропосферного озона TOR (Tropospheric Ozone Research) европейской программы EUROTRAC [32]. Станция расположена в Академгородке г. Томска, ее координаты ( $56^{\circ}28'$  с.ш.,  $85^{\circ}03'$  в.д.). Непрерывные автоматические измерения на ней были начаты в конце декабря 1992 г. и ведутся по настоящее время. Подробное описание структурной схемы TOR-станции по состоянию на 2018 г. представлено в [33].

В настоящей работе по данным непрерывного мониторинга параметров атмосферы в приземном слое воздуха на TOR-станции ИОА СО РАН анализируется взаимосвязь приземной УФ-радиации с факторами, изменяющими ее интенсивность (ОСО, облачность, АОТ).

## Описание исходных данных

На TOR-станции ИОА СО РАН [33] с 2002 по 2018 г. осуществлялся непрерывный мониторинг УФ–Б-радиации. Измерения проводились ультрафиолетовым пиранометром UVB-1 (Yankee Environmental Systems, Inc., США) в диапазоне длин волн 280–320 нм. Погрешность измерения прибора  $< 5\%$ , постоянная времени 0,1 с. Позже по техническим причинам измерения временно были прекращены. Принцип работы прибора, методика проведения измерений и способ регистрации данных рассмотрены нами в [34, 35]. Помимо этого, с осени 2003 по июль 2016 г. параллельно велся мониторинг спектральных характеристик УФ–Б-радиации с помощью спектрофотометра Brewer MKIV № 049 [35, 36].

По данным ежедневных наземных измерений рассчитаны суточные, месячные и годовые суммы УФ–Б-радиации. За период измерения УФ–Б-радиации в Томске отмечена тенденция ее уменьшения (относительная величина тренда, рассчитанная аналогично [37], составляет  $-5,9\%$ , рис. 1, а).

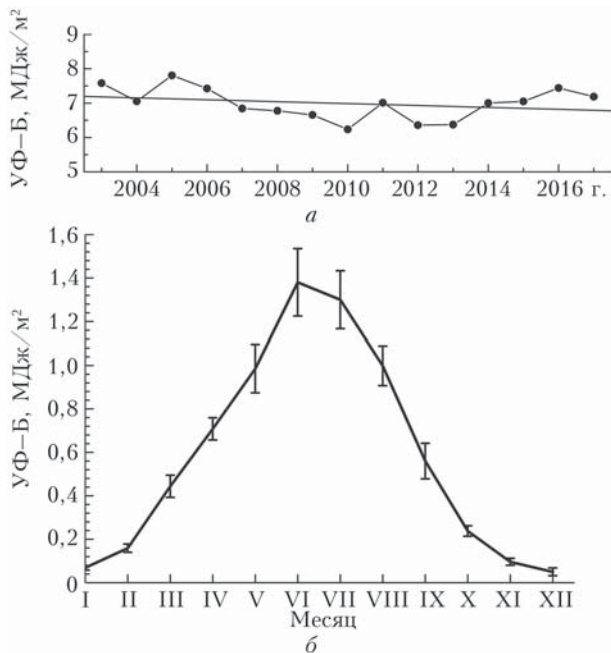


Рис. 1. Межгодовая изменчивость (а) и годовой ход (б) поступления УФ–Б-радиации в Томске

В то же время можно выделить два периода: 2003–2010 и 2012–2017 гг., когда наблюдалось уменьшение УФ–Б-радиации или наметилась тенденция ее роста. За период измерения годовые суммы колебались в пределах 6,5%. Среднегодовое поступление составило  $6,98 \pm 0,46$  МДж/м<sup>2</sup>. Максимум зарегистрирован в 2005 г. ( $7,8$  МДж/м<sup>2</sup>), а минимум – в 2010 г. ( $6,2$  МДж/м<sup>2</sup>). Коэффициент вариации месячных сумм менялся от 7 до 16% в разные сезоны (рис. 1, б). Максимальное поступление УФ–Б-радиации отмечено в июне ( $1,38 \pm 0,15$  МДж/м<sup>2</sup>), минимальное – в декабре ( $0,05 \pm 0,02$  МДж/м<sup>2</sup>). Среднесуточное поступление составило  $0,019 \pm 0,015$  МДж/м<sup>2</sup> с максимумом  $0,046 \pm 0,005$  МДж/м<sup>2</sup> в июне.

Для анализа факторов изменчивости суточных сумм приходящей к поверхности Земли УФ–Б-радиации использованы данные об АОТ<sub>500</sub>, полученные на основе наземных измерений прямого излучения фотометром CE-318 сети AERONET в Томске [38]. Мы использовали уровень обработки данных 2.0. Подробная методика обработки и фильтрации данных сети AERONET описана в [39]. Результаты спутникового мониторинга содержания озона в столбе атмосферы приборами AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), взятые с сайта <http://giovanni.gsfc.nasa.gov>. Дополнительно привлечена ежечасная информация о количестве общей облачности в дневное время на метеоплощадке Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН.

## Результаты

Общее содержание озона в основном определяется его стратосферной частью. На уровень ОСО может влиять целый ряд факторов, в том числе

и циркуляционные процессы в атмосфере, но его наибольшие изменения в Северном полушарии обусловлены ориентацией оси вращения Земли относительно потока солнечного излучения. В свою очередь, изменение содержания озона в атмосфере сказывается на доле потока УФ-радиации, поступающего в нижнюю тропосферу с верхней границы. Измерения УФ–Б-радиации и сопоставление полученных данных с вариациями ОСО показали, что их связь хорошо прослеживается на длительных периодах и не всегда устойчива на коротких [40]. Тем не менее наличие обратной взаимосвязи очевидно: чем меньше ОСО, тем большая часть УФ–Б-радиации доходит до поверхности планеты.

Вне зависимости от ОСО поступление УФ–Б-радиации в точке проведения измерений имеет ярко выраженный годовой ход с максимумом в летний период и минимумом зимой. С целью исключить влияние годового хода на оценку взаимосвязи их вариаций использовалось сравнение отклонений средних значений ОСО и суточных сумм УФ–Б-радиации для каждого дня ( $Y_i$ ) от средних многолетних значений для указанного дня времени года ( $Y_{i\text{сред}}$ ). Полученный результат нормировался на средние многолетние значения для данного дня времени года за рассматриваемый период. Отклонения рассчитывались по формуле

$$\Delta I = (Y_i - Y_{i\text{сред}}) / Y_{i\text{сред}} \cdot 100\%.$$

Таким образом были получены два многолетних (2003–2016 гг.) ряда дневных отклонений  $\Delta\text{ОСО}_i$  и  $\Delta\text{УФ–Б}_i$ , а также ряды отклонений для каждого года. В качестве примера на рис. 2 для 2011 г. показаны относительные изменения ОСО и суточных сумм УФ–Б-радиации от средних многолетних значений.

Между полученными рядами  $\Delta\text{ОСО}_i$  и  $\Delta\text{УФ–Б}_i$  выявлена существенная обратная корреляционная зависимость как для отдельных лет, так и всего периода наблюдений (табл. 1). Максимальная корреляция наблюдалась в 2011 г. с коэффициентом  $r = -0,42$ , минимальная – в 2006 г. ( $r = -0,22$ ). Все значения коэффициента корреляции в табл. 1 значимы с доверительной вероятностью 99%.

Коэффициент  $a$  показывает, на сколько процентов изменяется  $\Delta\text{УФ–Б}$ -радиация при увеличении общего содержания озона на 1%. Коэффициент  $b$  представляет собой процент прироста дневных сумм УФ–Б-радиации по отношению к средним многолетним значениям.

Ранее, в [41], было показано, что в Томске количество случаев отсутствия облаков в дневные часы наблюдений составляет меньше 9%, в остальных случаях наблюдаются облачные образования. В анализируемый период прослеживается тенденция увеличения балла общей и нижней облачности. Мы оценили совместное влияние облачности и АОТ на суточное поступление УФ–Б-радиации при изменении ОСО. Для этого из всего массива данных было сформировано несколько массивов,

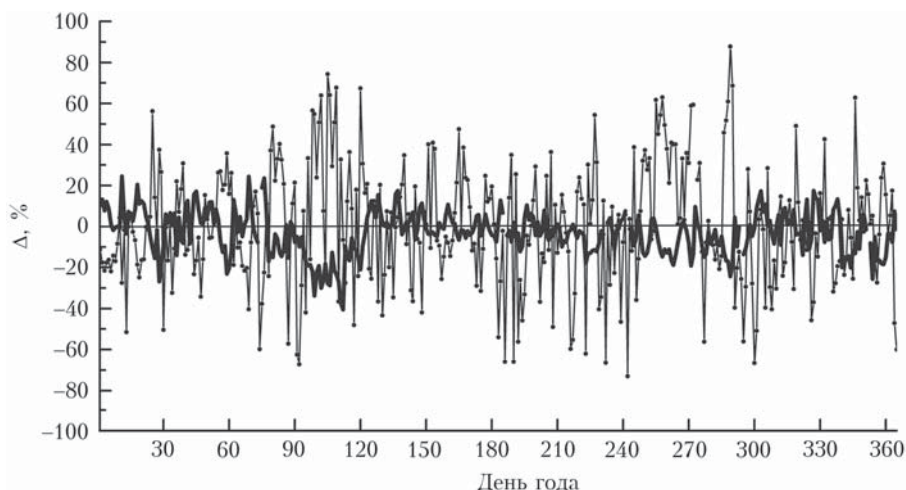


Рис. 2. Отклонение УФ–Б-радиации (полужирная кривая) и ОСО (тонкая кривая) в 2011 г. от средних многолетних значений

Таблица 1

Коэффициент корреляции  $\Delta\text{ОСО}_i$  и  $\Delta\text{УФ–Б}_i$

Год	$r$	$a \pm \text{Se}(a)$	$b \pm \text{Se}(b)$
2003	-0,26	-0,86 ± 0,34	4,91 ± 3,06
2004	-0,24	-0,90 ± 0,39	9,57 ± 3,98
2005	-0,31	-1,46 ± 0,46	21,86 ± 4,05
2006	-0,22	-0,87 ± 0,41	12,60 ± 4,01
2007	-0,34	-1,11 ± 0,33	-4,91 ± 2,94
2008	-0,28	-0,87 ± 0,32	-7,28 ± 3,29
2009	-0,33	-1,10 ± 0,33	-3,29 ± 3,11
2010	-0,30	-0,72 ± 0,25	-6,31 ± 3,10
2011	-0,42	-1,15 ± 0,26	-2,51 ± 2,85
2012	-0,25	-0,80 ± 0,32	-8,81 ± 3,17
2013	-0,26	-0,70 ± 0,27	-7,35 ± 3,05
2014	-0,34	-0,96 ± 0,28	-3,56 ± 2,92
2015	-0,40	-1,19 ± 0,29	-2,62 ± 2,95
2016	-0,41	-1,18 ± 0,27	4,59 ± 3,16
2003–2016	-0,28	-0,93 ± 0,10	0,63 ± 0,98

Примечание.  $a, b$  – коэффициенты уравнения линейной регрессии  $Y = aX + b$ , где  $X$  – соответствующее значение  $\Delta\text{ОСО}_i$ , а  $Y$  равен прогнозируемому значению  $\Delta\text{УФ–Б}_i$  для заданного  $X$ ;  $\text{Se}(a)$  и  $\text{Se}(b)$  – стандартные ошибки коэффициентов регрессии  $a, b$ .

отсортированных по значению балла облачности в светлое время суток. В итоге получилось пять массивов с разным баллом общей облачности ( $N_{\text{общ}}$ ):

- I –  $N_{\text{общ}} \leq 2$  (411 день),
- II –  $2 < N_{\text{общ}} \leq 4$  (238 день),
- III –  $4 < N_{\text{общ}} \leq 6$  (326 день),
- IV –  $6 < N_{\text{общ}} \leq 8$  (582 дня),
- V –  $8 < N_{\text{общ}} \leq 10$  (3351 день).

На рис. 3, а и рис. 3, б в качестве примера приведена зависимость отклонения  $\Delta\text{УФ–Б}_i$  от  $\Delta\text{ОСО}_i$  для ясных ( $N_{\text{общ}} \leq 2$ ) и пасмурных ( $8 < N_{\text{общ}} \leq 10$ ) дней.

Затем внутри каждого из пяти полученных массивов данных были выбраны дни с  $\text{АОТ}_{500} \leq 0,15$  («чистая атмосфера»): I – 172 дня, II –

78 дней, III – 126 дней, IV – 217 дней, V – 503 дня. На рис. 3, в и рис. 3, г можно увидеть, как меняется ситуация, если мы рассматриваем дни только с «чистой атмосферой». Во всех массивах коэффициенты корреляции значимы с достоверностью не ниже 99%. И, несмотря на значительный разброс значений относительно линии регрессии (на рис. 3), мы видим достаточно значимую отрицательную корреляцию, для которой в условиях ясного неба ( $N_{\text{общ}} \leq 2$ )  $r = -0,47$  и  $-0,56$  для «чистой атмосферы», а для пасмурного неба ( $8 < N_{\text{общ}} \leq 10$ ) коэффициенты корреляции существенно ниже и равны  $-0,25$  и  $-0,38$ .

В результате обработки данных по пяти массивам, сформированным с учетом балла облачности без учета АОТ, и по пяти массивам с учетом АОТ были выявлены зависимости  $\Delta\text{УФ–Б}_i$  от  $\Delta\text{ОСО}_i$  для каждого диапазона балла облачности без учета АОТ и при  $\text{АОТ}_{500} \leq 0,15$  (табл. 2).

Из рис. 3 и табл. 2 следует, что в условиях прозрачной атмосферы и минимальной облачности среднее отклонение УФ–Б-радиации по отношению ко всем отклонениям дневных сумм УФ–Б-радиации, анализируемых в настоящей работе, составляет 31,2%. Следовательно, далее с использованием данных, приведенных в табл. 2, можно определить влияние облачности на уменьшение прироста дневных сумм УФ–Б-радиации по отношению к безоблачной и прозрачной атмосфере ( $N_{\text{общ}} \leq 2, \text{АОТ}_{500} \leq 0,15$ ). Для облачности  $2 < N_{\text{общ}} \leq 4$  ослабление составит 0,7%; для  $4 < N_{\text{общ}} \leq 6$  – 2,8%;  $6 < N_{\text{общ}} \leq 8$  – 12,0%; для  $8 < N_{\text{общ}} \leq 10$  – 28,7%.

Если не учитывать АОТ, то в условиях минимальной облачности среднее отклонение УФ–Б-радиации по отношению ко всем отклонениям дневных сумм УФ–Б-радиации составляет 23,8%. Данные табл. 2 позволяют определить влияние реальных условий АОТ по отношению к идеальным ( $\text{АОТ}_{500} \leq 0,15$ ). Для облачности  $N_{\text{общ}} \leq 2$  ослабление составит 7,4%; для  $2 < N_{\text{общ}} \leq 4$  – 6,9%;

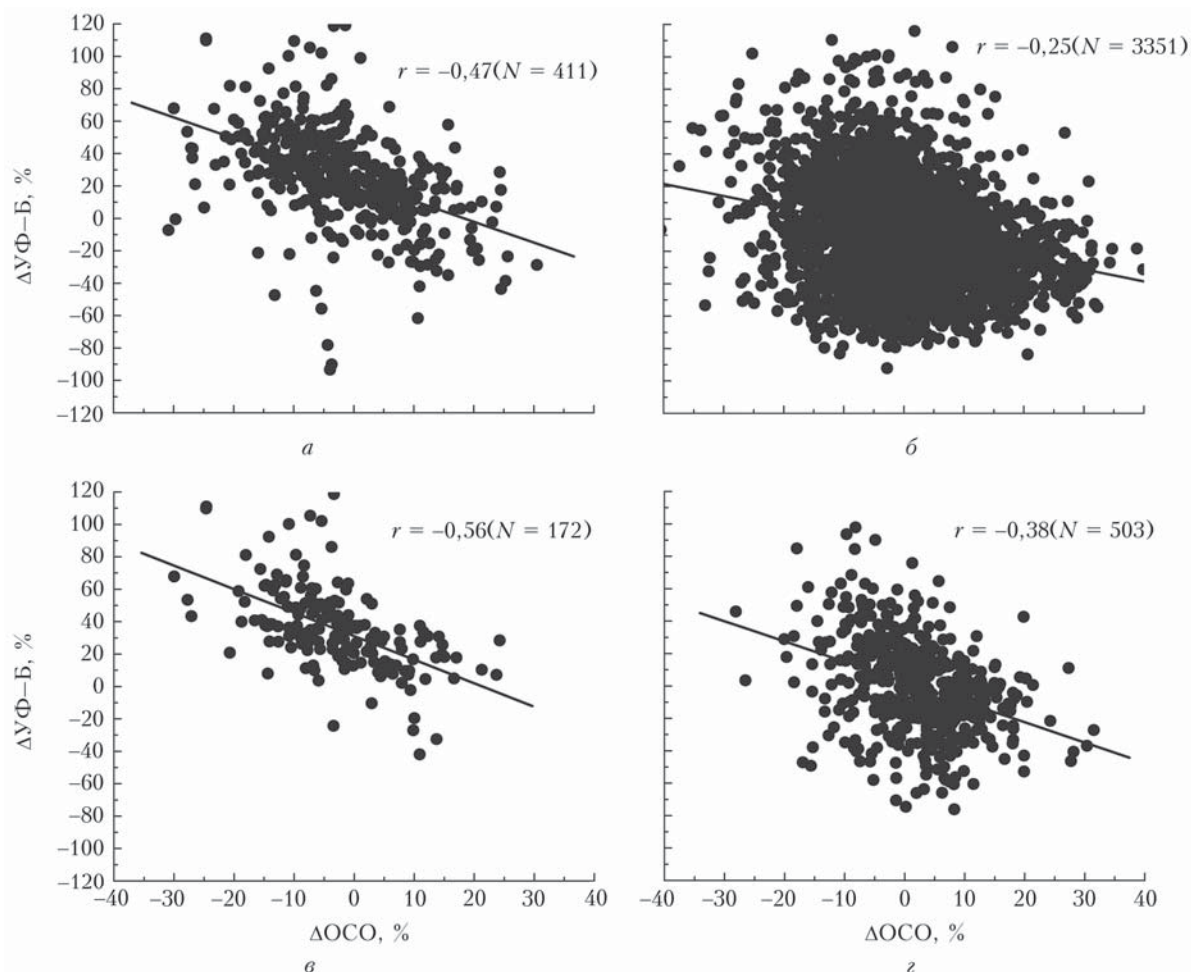


Рис. 3. Регрессионная связь  $\Delta УФ-Б_i$  и  $\Delta ОСО_i$  для ясных и пасмурных дней: *a* –  $N_{\text{общ}} \leq 2$ ; *б* –  $8 < N_{\text{общ}} \leq 10$ ; *в* –  $N_{\text{общ}} \leq 2$ ,  $AOT_{500} \leq 0,15$ ; *г* –  $8 < N_{\text{общ}} \leq 10$ ,  $AOT_{500} \leq 0,15$ ; коэффициент корреляции рассчитан с использованием  $N$  точек для доверительной вероятности 0,99

Таблица 2

Зависимости  $\Delta УФ-Б_i$  от  $\Delta ОСО_i$  при разном балле облачности и АОТ с доверительной вероятностью 0,99

Балл общей облачности	$a \pm Se(a)$	$b \pm Se(b)$	$r$	$N$
$N_{\text{общ}} \leq 2$	$-1,29 \pm 0,52$	$23,8 \pm 5,69$	-0,47	411
$2 < N_{\text{общ}} \leq 4$	$-1,58 \pm 0,30$	$23,6 \pm 2,91$	-0,56	238
$4 < N_{\text{общ}} \leq 6$	$-1,24 \pm 0,29$	$21,7 \pm 2,58$	-0,42	326
$6 < N_{\text{общ}} \leq 8$	$-1,36 \pm 0,21$	$14,9 \pm 2,1$	-0,46	582
$8 < N_{\text{общ}} \leq 10$	$-0,75 \pm 0,10$	$-8,4 \pm 1,03$	-0,25	3351
$N_{\text{общ}} \leq 6$	$-1,35 \pm 0,16$	$23,0 \pm 1,56$	-0,48	974
$AOT_{500} \leq 0,15$				
$N_{\text{общ}} \leq 2$	$-1,45 \pm 0,33$	$31,2 \pm 3,37$	-0,56	172
$2 < N_{\text{общ}} \leq 4$	$-1,88 \pm 0,56$	$30,5 \pm 4,56$	-0,61	78
$4 < N_{\text{общ}} \leq 6$	$-1,63 \pm 0,57$	$28,4 \pm 4,43$	-0,45	126
$6 < N_{\text{общ}} \leq 8$	$-1,64 \pm 0,37$	$19,2 \pm 3,24$	-0,52	217
$8 < N_{\text{общ}} \leq 10$	$-1,25 \pm 0,27$	$2,5 \pm 2,42$	-0,38	503
$N_{\text{общ}} \leq 6$	$-1,59 \pm 0,25$	$30,1 \pm 2,32$	-0,54	376

для  $4 < N_{\text{общ}} \leq 6$  – 6,7%;  $6 < N_{\text{общ}} \leq 8$  – 4,3%; для  $8 < N_{\text{общ}} \leq 10$  – 10,9%. Таким образом, фактически отмечающееся среднее ослабляющее влияние АОТ по сравнению с чистыми условиями составляет

от 4,3 до 10,9% для соответствующих условий облачности.

Полученные результаты не противоречат результатам из [19, 20, 25].

### Заключение

Анализ многолетних изменений суточного поступления УФ-Б-радиации и факторов, определяющих его, который был проведен на основе однородного ряда измерений на ТОР-станции ИОА СО РАН 2003–2016 гг. позволяет сделать следующие выводы.

В условиях безоблачной и прозрачной атмосферы ( $N_{\text{общ}} \leq 2$ ,  $AOT_{500} \leq 0,15$ ) увеличение ОСО на 1% приводит к уменьшению коротковолновой радиации в среднем на 1,45%.

Средний вклад АОТ в изменение суточного поступления составляет от 4,3 до 10,9% в зависимости от балла облачности.

Облака могут снижать прирост УФ-Б-радиации в среднем на 0,7–28,7% в зависимости от балла облачности, если считать, что при безоблачных условиях среднее значение суточного прихода вы-

ше на 31,2% по отношению к общим средним значениям.

В исследованиях не учитывались данные по альбедо подстилающей поверхности, которые также могут вносить существенный вклад в вариативность зависимости значений УФ-Б-радиации от ОСО.

Авторы благодарны организаторам сайтов <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>, <http://giovanni.gsfc.nasa.gov> за формирование информации и возможность ее свободного использования. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-50024). Для выполнения гранта использовалась инфраструктура ИОА СО РАН, созданная и эксплуатируемая по госзаданию № АААА-А17-117021310142-5, включая ЦКП «Атмосфера».

1. *Lean J.* The Sun's variable radiation and its relevance for Earth // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1997. V. 35. P. 33–67.
2. *Pittock B.* Can solar variations in the Earth's climate? // *Clim. Change.* 2009. V. 96. N 4, P. 483–487.
3. *Головки В.А.* Энергетические аспекты изменения климата Земли: взгляд из космоса // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2012. Т. 9, № 5. С. 140–154.
4. *Trenberth K.E., Fasullo J.T., Balmaseda M.A.* Earth's energy imbalance // *J. Clim.* 2014. V. 27, N 9. P. 3129–3144.
5. *Stephens G.L., L'Ecuyer T.* The Earth's energy balance // *Atmos. Res.* 2015. V. 166. P. 195–203.
6. *Tarasik D.W., Fioletov V.E., Wardle D.I., Kerr J.B., McArthur L.J.B., McLinden C.A.* Climatology and trends of surface UV radiation // *Atmos. Ocean.* 2003. V. 41, N 2. P. 121–138.
7. *Solanki S.K., Krivova N.A., Haigh J.D.* Solar irradiance variability and climate // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2013. V. 51. P. 311–351.
8. *Coddington O., Lean J.L., Pilewskie P., Snow M., Lindholm D.* A solar irradiance climate data and record // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2016. V. 97, N 7. P. 1265–1282.
9. *Sanchez-Lorenzo A., Enriquez-Alonso A., Wild M., Trentmann J., Vicente-Serrano S.M., Sanchez-Romero A., Posselt R., Hakuda M.Z.* Trends in downward surface solar radiation from satellites and ground observations over Europe during 1983–2010 // *Remote Sens. Environ.* 2017. V. 189. P. 108–117.
10. *Andrady A., Aucamp P.J., Austin A.T., Bais A.F., Ballaré C.L., Barnes P.W., Bernhard G.H., Björn L.O., Bornman J.F., Erickson D.J., de Gruijl F.R., Häder D.-P., Ilyas M., Longstreth J., Lucas R.M., Madronich S., McKenzie R.L., Neale R., Norval M., Pandey K.K., Paul N., Redhwi H.H., Robinson S.A., Rose K., Shao M., Sinha R.P., Solomon K.R., Sulzberger B., Takizawa Y., Torikai A., Tourpali K., Williamson C.E., Wilson S.R., Wängberg S.-A., Worrest R.C., Young A.R., Zepp R.G.* Environmental effects of ozone depletion and its interactions with climate change: Progress report, 2015 // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2016. V. 15, N 2. P. 141–174.
11. *Чубарова Н.Е.* Мониторинг биологически активной УФ-радиации в Московском регионе // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2002. Т. 38, № 3. С. 354–365.
12. *De Miguel A., Roman R., Bilbao J., Mateos D.* Evolution of erythemal and total shortwave solar radiation in Valladolid, Spain: Effect of atmospheric factors // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2011. V. 73, N 5–6. P. 578–586.
13. *Zerefos C.S., Toupali K., Eleftheratos K., Kazadzis S., Meleti C., Feister U., Koskela T., Heikkila A.* Evidence of a possible turning point in solar UV-B over Canada, Europe and Japan // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 5. P. 2469–2477.
14. *Нахаев М.И., Ананьев Л.Б., Иванова Н.С., Звягинцев А.М., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю.* Ультрафиолетовая облученность, УФ-индекс и их прогнозирование // *Тр. Гидрометцентра России.* 2014. Вып. 351. С. 173–187.
15. *Тимофеев Ю.М., Шульгина Е.М.* Российские исследования в области атмосферной радиации в 2011–2014 гг. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2016. Т. 52, № 5. С. 529–545.
16. *Herman J.R.* Global increase UV irradiance during the past 30 year (1979–2008) estimated from satellite data // *J. Geophys. Res. D.* 2010. V. 115. DOI: 10.1029/2009JD012219.
17. *Ezhova E., Ylivinkka I., Kuusk J., Komsaare K., Vana M., Krasnova A., Noe S., Arshinov M., Belan B., Park S., Lavric J., Heimann M., Kolari P., Petäjä T., Hari P., Vesälä T., Bäck J., Rannik U., Kerminen V.-M., Kulmala M.* Direct effect of aerosols on solar radiation and gross primary production in boreal forest // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 24. P. 17863–17881.
18. *Scientific Assessment of Ozone Depletion.* WMO. Report N 50. WMO, 2006. 572 p.
19. *Simic S., Weihs P., Vacek A., Kromp-Kolb H., Fitzka M.* Spectral UV measurements in Austria from 1994–2006: investigations of short- and long-term changes // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8, N 23. P. 7033–7043.
20. *Petkov B., Vitale V., Tomasi C., Mazzolo M., Lancanelli C., Lupi A., Busetto M.* Variations in total ozone column and biologically effective solar UV exposure doses in Bologna, Italy during the period 2005–2010 // *In. J. Biometeorol.* 2014. V. 58, N 1. P. 31–39.
21. *Anton M., Cazoria A., Mateos D., Costa M.J., Olmo F.J., Alados-Arboledas L.* Sensitivity of UV erythemal radiation to total ozone changes under different sky conditions: Results for Granada, Spain // *Photochem. Photobiol.* 2016. V. 92, N 1. P. 215–219.
22. *Garsia R.R.* Atmospheric science: An Arctic ozone hole? // *Nature.* 2011. V. 478, N 7370. P. 462–463.
23. *Gies P., Klekociuk A., Tully M., Henderson S., Javorniczky J., King K., Lemus-Deschamps L., Makin J.* Low ozone over Australia in August 2011 and its impact on solar ultraviolet radiation levels // *Photochem. Photobiol.* 2013. V. 89, N 4. P. 984–994.
24. *El-Nouby A.M., Ahmed E.A.* Comparative analysis of cloud effects on ultraviolet-B and broadband solar radiation: dependence on cloud amount and solar zenith angle // *Atmos. Res.* 2016. V. 168. P. 149–157.
25. *De Bock V., de Backer H., van Malderen R., Mangold A., Delcloo A.* Relations between erythemal UV dose, global solar radiation, total ozone column and aerosol optical depth at Uccle, Belgium // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 22. P. 12251–12270.
26. *Fountoulakis I., Bais A.F., Fragkos K., Meleti C., Tourpali K., Zempila M.M.* Short- and long-term variability of spectral solar UV irradiance at Thessaloniki, Greece: Effects of changes in aerosols, total ozone and clouds // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 4. P. 2493–2505.
27. *Antyn M., Sorribas M., Bennouna Y., Vilaplana J.M., Cachorro V.E., Gröbner J., Alados-Arboledas L.* Effects of an extreme desert dust event on the spectral

- ultraviolet irradiance at El Arenosillo (Spain) // J. Geophys. Res. D. 2012. V. 117. DOI: 10.1029/2011JD016645.
28. An J.L., Wang Y.S., Li X., Sun Y., Shen S.H. Relationship between surface UV radiation and air pollution in Beijing (in Chinese) // Environ Sci. 2008. V. 29, N 4. P. 1054–1058.
  29. Chubarova N., Nezval Ye., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I. Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5, N 3. P 557–568.
  30. Di Biagio C., di Sarra A., Eriksen P., Ascanius S.E., Muscari G., Holben B. Effect of surface albedo, water vapour, and atmospheric aerosols on the cloud-free shortwave radiative budget in the Arctic // Clim. Dyn. 2012. V. 39, N 3–4. P. 953–969.
  31. Simic S., Fitzka M., Schmalwieser A., Weihs P., Hadzimustafic J. Factors affecting UV irradiance at selected wavelengths at Hoher Sonnblick // Atmos. Res. 2011. V. 101, N 4. P. 869–878.
  32. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.В., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Лизотский А.В., Мелеишин В.Е., Панченко М.В., Покровский Е.В., Рогов А.Н., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. TOR-станция мониторинга атмосферных параметров // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1085–1092.
  33. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофанов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlestin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V. Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of the tropospheric ozone research station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 180–192.
  34. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Скляднева Т.К. Многолетний мониторинг суммарной и ультрафиолетовой (В) радиации в районе г. Томска // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 61–65.
  35. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Скляднева Т.К. Влияние города на приходящую ультрафиолетовую радиацию по результатам многолетнего мониторинга в районе Томска // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1113–1119; Belan B.D., Ivlev G.A., Sklyadneva T.K. Long-term monitoring of total and UV-B radiation in Tomsk // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 4. P. 281–285.
  36. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Скляднева Т.К. Вариации ультрафиолетовой В-радиации в Томске в 2003–2007 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 7. С. 619–624.
  37. Житорчук Ю.В., Стадник В.В., Шамина И.Н. Исследование линейных трендов во временных рядах солнечной радиации // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1994. Т. 30, № 3. С. 389–391.
  38. URL: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov> (last access: 26.02.2020)
  39. Giles D.M., Sinyuk A., Sorokin M.G., Schafer J.S., Smirnov A., Slutsker I., Eck T.F., Holben B.N., Lewis J.R., Campbell J.R., Welton E.J., Korkin S.V., Lyapustin A.I.: Advancements in the aerosol robotic network (AERONET) Version 3 database – automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements // Atmos. Meas. Tech. 2019. V. 12. P 169–209.
  40. Casale G.R., Meloni D., Palmieri S., Siani A.M. Solar UV-B irradiance and total ozone in Italy: Fluctuations and trends // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 4. P. 4895–4901.
  41. Скляднева Т.К., Рассказчикова Т.М., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю. Изменения радиационных и метеорологических параметров атмосферы по данным наблюдений в Томске // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 4. С. 288–293.

**B.D. Belan, G.A. Ivlev, T.K. Sklyadneva. The relationships between ultraviolet radiation and factors influencing it. Part I. The role of the total ozone content, cloudiness, and aerosol optical depth.**

The relationship of the daily UV-B radiation with factors influencing it (total ozone content, cloudiness, and aerosol optical depth) is analyzed. For this purpose, a homogeneous series of UV-B radiation data obtained at the TOR-station of the IAO SB RAS from 2003 to 2016, as well as satellite data on TOC, AOT data from AERONET network, and the data on total cloud cover from the meteorological site of IMCES SB RAS were used. The regression equations of the daily UV-B radiation variations depending on the changes in total ozone content under different cloudiness and air transparency conditions have been derived.