

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.521.510+57.045

Сравнительный анализ рядов наблюдений общего содержания озона и УФ–В-радиации в зонах произрастания бореальных лесов

В.В. Зуев^{1,2}, Н.Е. Зуева¹, Е.М. Короткова^{1*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 8.07.2015 г.

Приведены результаты корреляционного анализа рядов наблюдений общего содержания озона (ОСО) и ультрафиолетовой радиации диапазона длин волн 300–315 нм (УФ–В-радиация) станций умеренного пояса Северного полушария (выше 50° с.ш.) России и Канады, расположенных в зоне произрастания бореальных лесов. Показано, что в этой климатической зоне основным модулятором биологически активной части спектра УФ–В-радиации является озоносфера. Определены коэффициенты радиационного усиления солнечного излучения в УФ–В-области спектра. Показано, что истощение ОСО на 20% относительно многолетнего среднего более чем в 2 раза повышает дозу солнечного излучения коротковолновой части спектра УФ–В-радиации относительно ее климатической нормы.

Ключевые слова: УФ–В-радиация, спектр биологического действия, озоносфера, общее содержание озона, корреляционный анализ; UV–B radiation, biologically active spectra, ozonosphere, total ozone, correlation analysis.

Введение

Наиболее выраженное деструктивное воздействие на биосферу способна оказывать коротковолновая часть ультрафиолетовой солнечной радиации (УФР) диапазона длин волн 280–315 нм (УФ–В-радиация), поскольку фактически максимум спектра поглощения биологическими макромолекулами (белками и нуклеиновыми кислотами) совпадает с нижней границей данного спектрального диапазона. Поглощение высокоэнергетичных фотонов приводит к разрыву молекулярных связей и способствует возникновению негативных изменений, которые могут сохраняться в течение нескольких лет [1–3]. Свертка двух функций – биологической чувствительности живых организмов, характеризующей эффективность поглощения УФР биологическими макромолекулами, и интенсивности УФР, представляет собой биологически активный спектр, максимум которого соответствует длине волны $\lambda = 305$ нм [4].

Известно, что интенсивность прямой приземной солнечной радиации определяется общим содержанием озона (ОСО), а также аэрозольным и газовым состоянием атмосферы [5]. Вклад ОСО в изменчивость коротковолновой УФР является преобладающим

фактором, поскольку основное поглощение происходит в полосах озона Хартли и Хаггинса, а влияние аэрозольно-облачной составляющей в УФ–В-области спектра ниже, чем в видимом диапазоне длин волн [6–8]. Таким образом, при высоком уровне ОСО в средних и высоких широтах основным природным фильтром, регулирующим уровень приходящей УФ–В-радиации, является озоновый слой [5].

Характер влияния ультрафиолетовой радиации на физиологические процессы растения зависит не только от длины волны, но и от продолжительности облучения. Исследования отклика фотосинтетического аппарата саженцев ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на воздействие УФ–В-радиации на длине волны 308 нм показали, что к кратковременному воздействию в границах естественного синоптического периода (около 7 дней) фотосинтетический аппарат ели толерантен. Однако результатом экспозиции в течение 15 сут, что соответствует среднему времени жизни блокирующего антициклона, формирования которого сопровождается понижением ОСО, стал выраженный спад содержания фотосинтетических пигментов, квантового выхода первичного разделения зарядов ФС II и интенсивности наблюдаемого фотосинтеза: отмечалось увеличение интенсивности дыхания и замедление роста хвои текущего года. Аномальное по продолжительности воздействие (до 3 нед) привело к серьезным необратимым нарушениям структуры и функционального состояния фотосинтетического аппарата экспериментальной группы

* Владимир Владимирович Зуев (vzuev@imces.ru);
Нина Евгеньевна Зуева (vzuev@list.ru); Екатерина Михайловна Короткова (katia_sova@mail.ru).

растений [9]. Повторяемость блокирующих антициклонов невелика и составляет примерно 1%, однако аномальное понижение ОСО относительно многолетней нормы может происходить при вулканогенных возмущениях стратосферы [10], а также над зонами тектонических разломов [11].

В континентальных районах средних и высоких широт Северного полушария бореальные леса, основу которых составляют вечнозеленые хвойные растения, являются основным естественным модулятором концентрации углекислого газа в нижней атмосфере, поскольку основной сток углерода осуществляется за счет фотосинтетической аккумуляции в растительной биомассе и подстилающей почве. Однако именно таежные леса наиболее чувствительны к стрессовым воздействиям [12], в том числе и к длительному влиянию повышенных доз коротковолновой УФ–В-радиации, вызванному отрицательными озоновыми аномалиями.

При всей значимости проблемы, связанной с влиянием приходящей ультрафиолетовой радиации на биосферу, данные спутниковых измерений не позволяют провести корректную оценку ее коротковолновой части, а наземная сеть наблюдений недостаточно развита. В то же время сформирована широкая озонометрическая сеть наземных наблюдений, а данные спутникового зондирования общего содержания озона в атмосфере можно получить практически для любых географических координат. Таким образом, для прогнозирования и оценки негативных воздействий УФ–В-радиации на биосферу, в том числе связанных с депрессией фотосинтетических процессов бореальных лесов, важным является исследование значимости связи ОСО и коротковолновой УФР.

Корреляционный анализ временных рядов ОСО и полного диапазона спектра приземной УФ–В-радиации для станции Эдмонтон (Канада), а также ОСО и УФР на длине волны 305 нм для пяти станций Канады, расположенных в регионах с разными климатическими условиями, показал, что основным модулятором биологически активной УФР ($\lambda < 310$ нм) является озоносфера [13–15]. Выбор станций Канады был обусловлен отсутствием репре-

зентативных данных о коротковолновой УФ–В-радиации для зоны бореальных лесов Восточного полушария. В настоящее время ряд радиационных наблюдений в Томске за период 2004–2012 гг. позволяет провести подобные исследования для спектрального диапазона 300–315 нм и сопоставить полученные результаты с данными корреляционного анализа для станций Западного полушария, близких по своему широтному расположению.

Многолетние нормы ОСО, УФ–В-радиации и облачности

Для выполнения корреляционного анализа были выбраны станции наземных наблюдений УФР, расположенные в узком широтном поясе 53,31–56,48° с.ш.: Томск (Россия) в Восточном полушарии, Гус-Бей и Эдмонтон (Канада) в Западном полушарии. Информация о географических координатах, абсолютной высоте станций, климате и среднем количестве пасмурных дней в году представлена в табл. 1.

Ряды среднемесячных значений ОСО за период с 1979 по 2012 г. были получены по данным реанализа TEMIS спутниковых измерений аппаратурой TOMS, OMI и SIAMACHY [16]. Для формирования рядов среднемесячных значений дозы УФ–В-радиации на длинах волн 300, 305, 310 и 315 нм были использованы данные наземных измерений, выполненных спектрофотометром Brewer, базы Всемирного центра WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre) [17]. Сведения о периоде мониторинга УФР и временном интервале, в рамках которого в дальнейшем выполнялся корреляционный анализ, приведены в табл. 2.

Для построения климатической нормы УФ–В-радиации были использованы данные полного периода мониторинга УФР, а ограничения, касающиеся анализируемого периода, обусловлены требованиями сравнительного анализа.

На рис. 1 представлены климатические нормы ОСО (рис. 1, а) и УФ–В-радиации на длине волны 305 нм (рис. 1, б), а также многолетнее среднее количество пасмурных дней в году (рис. 1, в).

Таблица 1

Географические координаты, абсолютная высота, климат и количество пасмурных дней станций наземного мониторинга УФР

Станция наземного мониторинга	Географические координаты	Абсолютная высота, м	Климат	Количество пасмурных дней, %/год*
Гус-Бей	53,31° с.ш.; 60,36° з.д.	44	умеренный морской	64,82
Эдмонтон	53,55° с.ш.; 114,10° з.д.	766	резко-континентальный	43,63
Томск	56,48° с.ш.; 85,07° в.д.	170	континентальный	47,67

* Информация о количестве пасмурных дней получена по данным сайтов world-weather.ru и climatebase.ru.

Таблица 2

Период мониторинга УФР и временной интервал, в рамках которого выполнялся корреляционный анализ

Станция наземного мониторинга	Период мониторинга УФР	Анализируемый период	Продолжительность анализируемого периода, лет
Гус-Бей	1997–2012	2005–2011	7
Эдмонтон	1992–2010	2002–2006, 2008–2010	8
Томск	2004, 2006–2012	2004, 2006–2012	8

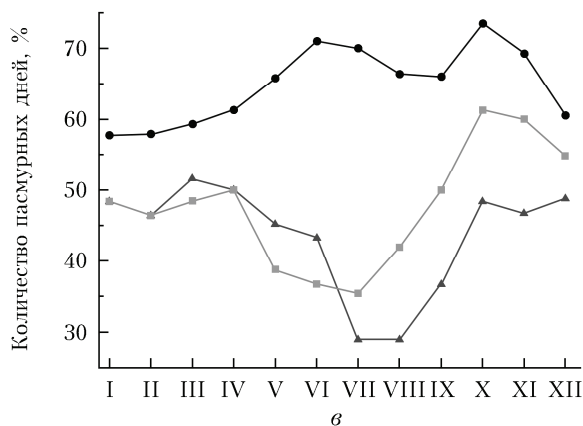
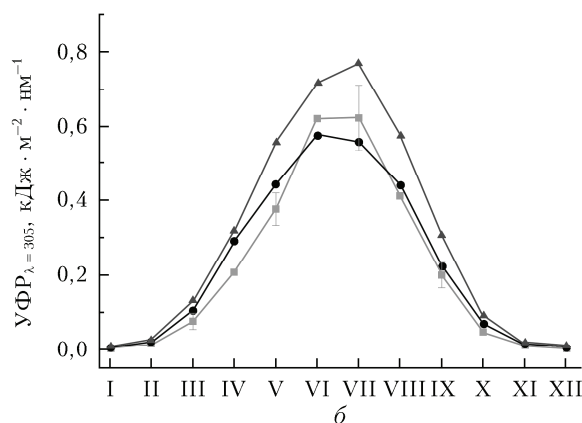
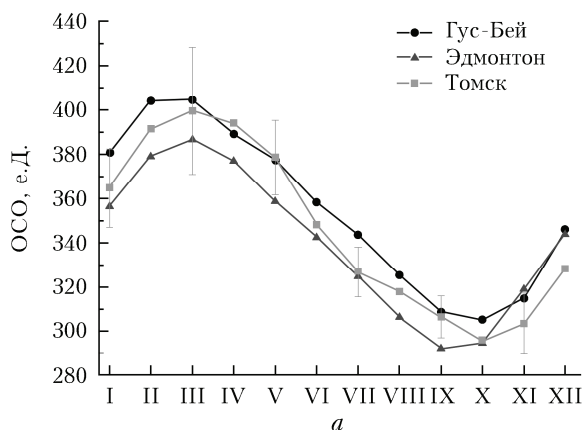


Рис. 1. Климатические нормы СО (а) и УФ–В-радиации (б), многолетнее среднее количество пасмурных дней в году (в) (показаны интервалы СКО)

Известно, что пространственное распределение суммарного озона определяется главным образом географической широтой региона и циркуляционными атмосферными процессами. В поясе умеренных и высоких широт уровень СО имеет ярко выраженный годовой ход. На рис. 1, а представлены климатические нормы (многолетнее среднее) СО для каждой станции, рассчитанные по среднемесячным значениям за весь период наблюдений. Очевидно, что максимум суммарного озона для всех станций наблюдается в марте, многолетний минимум для Томска и Гус-Бей регистрируется в октябре. Минимум СО над Эдмонтоном проявляется в сентябре, что может быть связано с региональными особенностями горного климата. Динамикой атмосферных процессов определяются более высокие значения СО над станцией Гус-Бей в течение года и над Томском в зимне-весенний период.

Многолетние нормы УФ–В-радиации также имеют выраженный годовой ход. Климатический максимум УФР регистрируется в дни летнего солнцестояния, т.е. в июне–июле. На рис. 1, б приведены климатические нормы УФР на длине волны 305 нм. Очевидно, что для коротковолновой УФР

также явно проявляются региональные особенности, связанные в первую очередь с аэрозольно-облачной ситуацией (рис. 1, в).

Минимальное количество пасмурных дней в летний период регистрируется в Эдмонтоне, максимальное — на станции Гус-Бей. Для климатических норм УФ–В-радиации проявляется обратная закономерность. Таким образом, облачность фактически выполняет функцию своеобразного фильтра, определяющего приземный уровень коротковолновой солнечной радиации, однако внутригодовая изменчивость УФ–В-радиации обусловлена состоянием озоносферы. На рис. 2 представлены климатические нормы СО и УФР на длине волны 305 нм ($УФР_{\lambda=305}$), а также среднемесячные значения СО и $УФР_{\lambda=305}$ в 2005 и 2010 гг. для станции Гус-Бей. Очевидно, что при более низких, относительно многолетнего среднего, значениях СО уровень приземной коротковолновой радиации превышал климатическую норму (февраль–июль 2005 г.). В том случае, когда среднемесячные значения СО были выше многолетнего среднего, регистрировался более низкий (относительно климатической нормы) уровень коротковолновой УФР (март–июль 2010 г.).

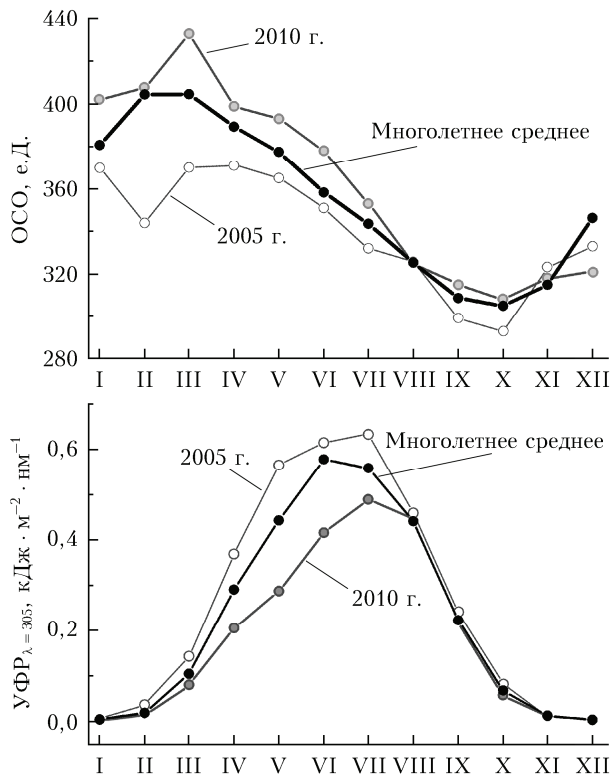


Рис. 2. Климатические нормы ОСО и $УФR_{\lambda=305}$ и временные ряды среднемесячных значений ОСО и $УФR_{\lambda=305}$ в 2005 и 2010 гг. для станции Гус-Бей

Результаты корреляционного анализа рядов ОСО и УФР

Чтобы выявить степень влияния изменений ОСО на модуляции приземного уровня $УФ-B$ -радиации, для выбранных станций был проведен корреляционный анализ рядов среднемесячных значений ОСО и $УФ-B$ -радиации на длинах волн 300, 305, 310 и 315 нм. Поскольку статистическая значимость коэффициентов корреляции зависит от выборки N , временной интервал выбирался таким образом, что-

бы обеспечить возможность выполнения сравнительного анализа (см. табл. 2), что, в свою очередь, позволило оценить влияние аэрозольно-облачной составляющей.

Климатические нормы рядов ОСО и $УФ-B$ -радиации имеют выраженный временной сдвиг, поэтому годовой ход был исключен и корреляционный анализ проводился между рядами, приведенными к виду нормированных отклонений от соответствующего значения многолетнего среднего по формуле

$$I_i(t) = \frac{[x_i(t) - \bar{x}_i(t)]}{\bar{x}_i(t)}, \quad (1)$$

где $x_i(t)$ – текущее значение ряда, $\bar{x}_i(t)$ – многолетнее среднее, соответствующее данному значению.

Кроме того, в сформированных рядах было произведено вычитание линейных трендов, имеющих противоположные тенденции, и тем самым усиливающих корреляцию. Анализ проводился для полного анализируемого периода и в том же временном диапазоне максимально выраженного, в рассматриваемых регионах, вегетационного периода (месяцы май–август). Оценка статистической значимости результатов корреляционного анализа выполнялась по t -критерию Стьюдента для доверительной вероятности 0,99. Коэффициенты корреляции R временных рядов нормированных отклонений среднемесячных значений ОСО и $УФ-B$ -радиации приведены в табл. 3.

Очевидно, что в соответствии с критерием тесноты связи для станций Гус-Бей и Эдмонтон для полного периода сильная корреляция существует между временными рядами относительных отклонений среднемесячных значений ОСО и $УФ-B$ -радиации на длинах волн $\lambda \leq 305$ нм и умеренная для $УФ-B$ на длине волны $\lambda \sim 310$ нм. На рис. 3 представлены временные ряды и диаграмма рассеяния относительных отклонений среднемесячных значений ОСО и УФР на длине волны 305 нм для станции Гус-Бей. Явно прослеживается противофазность колебаний параметров, которая формирует их высокую отрицательную корреляцию.

Таблица 3

Результаты корреляционного анализа рядов относительных отклонений среднемесячных значений ОСО и $УФ-B$ -радиации за полный и вегетационный (май–август) периоды

Пункт наблюдений	Гус-Бей		Эдмонтон		Томск	
	полный	V–VIII	полный	V–VIII	полный	V–VIII
Объем выборки, N	83	28	84	32	80	30
$ R _{\min 0,99}$	0,28	0,47	0,28	0,45	0,29	0,46
$R_{\lambda=300}$	-0,77	-0,85	-0,80	-0,90	-0,68	-0,82
$R_{\lambda=305}$	-0,76	-0,74	-0,76	-0,76	-0,63	-0,76
$R_{\lambda=310}$	-0,58	-0,59	-0,64	-0,55	-0,44	-0,64
$R_{\lambda=315}$	-0,30	-0,43	-0,46	-0,32	-0,30	-0,51

Примечание. $|R|_{\min 0,99}$ – значения коэффициентов линейной корреляции, необходимые для достижения статистической значимости при доверительной вероятности 0,99; жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции R .

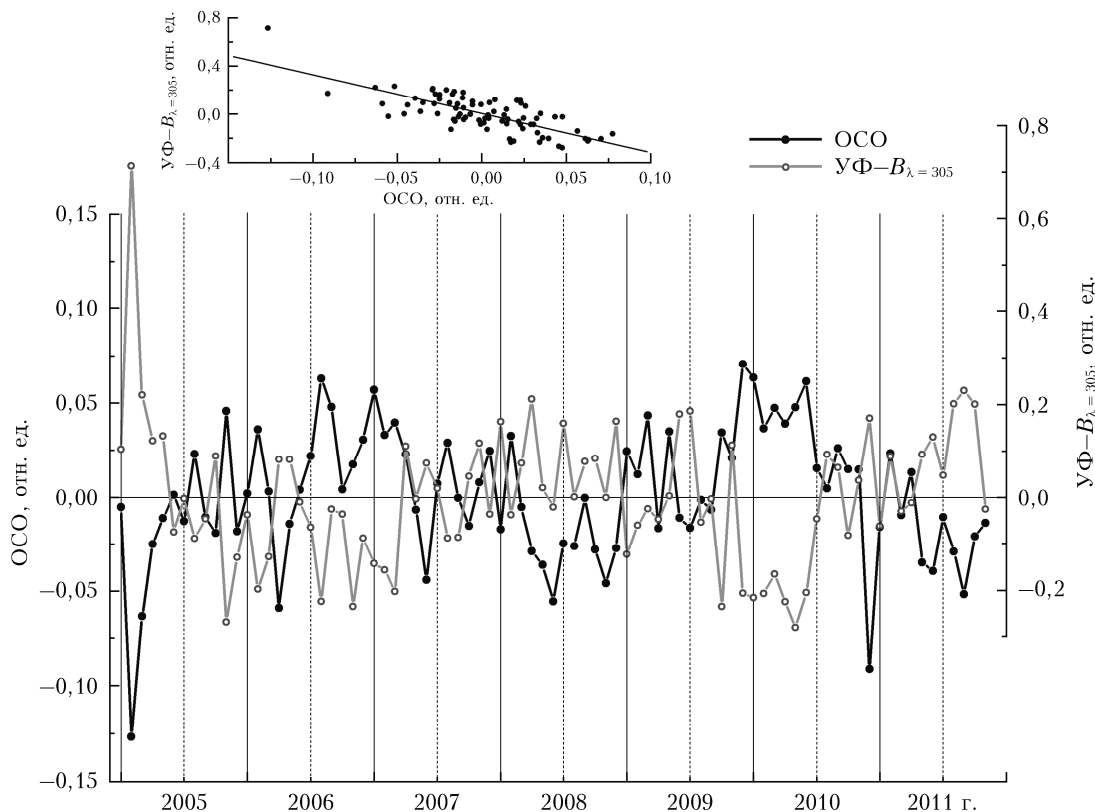


Рис. 3. Временные ряды и диаграмма рассеяния относительных отклонений среднемесячных значений ОСО и УФР на длине волны 305 нм для станции Гус-Бей

Несколько более низкий уровень корреляции рассматриваемых параметров для Томска может быть связан с относительно коротким периодом наблюдений УФР, что не позволило корректно определить климатическую норму. Неточности в построении климатической нормы особенно явно проявляются для холодного времени года при низких уровнях приземной УФ-В-радиации. Для вегетационного периода статистически высокая степень корреляции для УФ-В на длинах волн $\lambda \leq 305$ нм и умеренная для УФР на длине волн $\lambda \sim 310$ нм проявляется для всех трех станций. Значения коэффициентов корреляции при явно различной, особенно в летний период, облачной составляющей фактически одинаковы. Следовательно, в регионах произрастания бореальных лесов основным модулятором приземной УФ-В-радиации биологически активной части спектра является озоносфера.

Оценка коэффициентов радиационного усиления

Высокая отрицательная связь ОСО и УФ-В-радиации обуславливает выраженный рост УФР при деструкции стратосферного озона. В тех случаях, когда истощение стратосферного озона не превышает 45%, взаимосвязь между изменениями ОСО (ΔO_3) и изменчивостью дозы УФ-В-радиации ΔE можно описать уравнением [2, 4]:

$$K = -\frac{\Delta E/E}{\Delta O_3/O_3}, \quad (2)$$

где K – коэффициент радиационного усиления.

Расчеты, выполненные в соответствии с уравнением (2) на основе рядов относительных отклонений среднемесячных значений ОСО и дозы УФ-В-радиации от многолетнего среднего, позволили определить коэффициенты радиационного усиления K , в том числе и для вегетационного периода. Установлено, что на каждой длине волны коэффициенты K для всех трех станций достаточно близки по величине, их разброс находится в пределах 3,4–10,0 и 4,0–10,6% для полного и вегетационного периодов соответственно. Средние абсолютные значения $|K|$ для зоны бореальных лесов представлены на рис. 4. Видно, что зависимость K от длины волн λ имеет экспоненциальный характер.

Анализ временных рядов ОСО и УФ-В-радиации среднемесячных и среднесуточных данных [13] показывает, что в умеренном поясе Северного полушария вариации приземной солнечной радиации на длинах волн короче 310 нм всегда обусловлены колебаниями ОСО. Зная коэффициент радиационного усиления для данного региона и анализируя поведение озоносферы, можно оценить риски для биосферы, связанные с ростом дозы коротковолновой УФР, возникающие при отрицательной озоновой аномалии. Так, истощение озона на 20%, аналогичное тому, которое имело место над Томском в апреле 2011 г.,

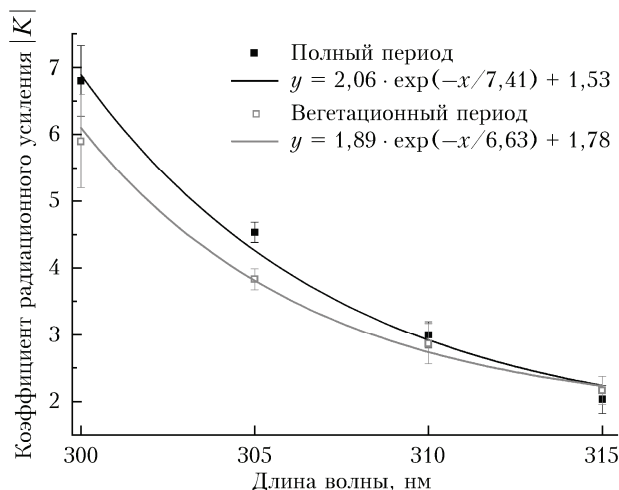


Рис. 4. Средние абсолютные значения коэффициентов радиационного усиления $|K|$ солнечного излучения на длинах волн 300, 305, 310 и 315 нм (показаны интервалы СКО)

приведет к увеличению дозы приземной УФР на длине волны 305 нм при среднем $|K| \sim 4$ на 80%, т.е. в 1,8 раза относительно нормы. На длине волны 300 нм при $|K| \sim 6,5$ подобная депрессия озона увеличит дозу радиации уже в 2,3 раза. Таким образом, с учетом экспоненциальной зависимости коэффициента радиационного усиления от длины волны глубокие озоновые аномалии существенно увеличивают дозу наиболее деструктивной части коротковолновой УФ-В-радиации. В течение вегетационного периода, особенно в его начальной стадии, глубокие длительные депрессии озоносферы способны спровоцировать серьезные необратимые нарушения структуры и функционального состояния фотосинтетического аппарата растений бореальной зоны.

Заключение

Полученные результаты показывают, что в широтном поясе произрастания бореальных лесов ($50 \leq \varphi \leq 60^\circ$ с.ш.) основным модулятором приземной коротковолновой УФ-радиации является стратосферный озоновый слой. Именно колебания ОСО обуславливают изменение потока приходящей биологически активной солнечной радиации на длинах волн $\lambda \leq 310$ нм. В данном диапазоне спектра между временными рядами отклонений среднемесячных значений ОСО и УФ-В-радиации относительно климатической нормы существует тесная корреляционная связь (с доверительной вероятностью 0,99) вне зависимости от климатических условий. При этом различия климатической нормы УФР для регионов узкого широтного пояса в значительной степени определяются аэрозольно-облачным состоянием атмосферы. Статистически высокая корреляция параметров и наличие линейной связи между отклонениями ОСО и дозой УФ-В-радиации относительно нормы позволили определить средние значения коэффициентов радиационного усиления на длинах волн $\lambda < 315$ нм для данной климатической зоны. Таким

образом, в регионах средних широт можно оценивать риски, связанные с ростом коротковолновой УФР при отсутствии рядов наблюдений, используя данные об общем содержании озона в атмосфере.

1. *Ultraviolet radiation: An authoritative scientific review of environmental and health effects of UV, with reference to global ozone layer depletion* // Environmental health criteria. Geneva: World Health Organization, 1994. V. 160. 352 p.
2. *Kondratyev K.Ya., Varotsos C.A.* Atmospheric Ozone Variability: Implications for Climate Change, Human Health and Ecosystems. Chichester U.K.: Springer PRAXIS, 2000. 617 p.
3. *Кондратьев К.Я., Федченко П.П.* Влияние спектра солнечной радиации на эволюцию биосферы // Вестн. РАН. 2005. Т. 75, № 6. С. 522–532.
4. *Madronich S., Flocke S.* Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the Earth's surface / Ed. by C. Zerefos // Solar Ultraviolet Radiation – Modeling, Measurements and Effects, NATO ASI Series. Berlin: Springer, 1997. V. 152. P. 23–48.
5. *Гущин Г.П., Виноградова Н.Н.* Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 237 с.
6. *Lubin D., Jensen E.H., Gies H.P.* Global surface ultraviolet radiation climatology from TOMS and ERBE data // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, N 20. P. 26061–26091.
7. *Joafsson W., Landelivs T.* Effect of clouds on UV irradiance: As estimated from cloud amount, cloud type, precipitation, global radiation and sunshine duration // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 4. P. 4927–4935.
8. *Bernhard G., Mayer B., Seckmeyer G., Moise A.* Measurements of spectral solar UV irradiance in tropical Australia // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102, N 7. P. 8719–8730.
9. *Зуев В.В., Зуева Н.Е., Зотикова А.П., Бендер О.Г., Правдин В.Л.* Комплексные исследования отклика фотосинтетического аппарата ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.) на воздействие УФ-В-радиации // Журн. Сибирского федерального ун-та. Сер. Биология. 2010. Т. 3, № 4. С. 391–406.
10. *Зуев В.В.* Дистанционный оптический контроль стратосферных изменений. Томск: МГП «РАСКО», 2000. 140 с.
11. *Сывороткин В.Л.* Экологические аспекты дегазации Земли: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2001. 302 с.
12. *Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф.* Моделирование глобального круговорота углерода. М.: Физматлит, 2004. 336 с.
13. *Зуева Н.Е.* Связь изменений биологически активной УФ-В-солнечной радиации с колебаниями общего содержания озона // Журн. СФУ. Сер. Биология. 2008. Т. 1, № 4. С. 345–357.
14. *Зуев В.В., Зуева Н.Е.* Влияние вариаций суммарного озона на изменение уровня УФ-В-радиации // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 12. С. 1053–1061.
15. *Zueva N.E., Zuev V.V.* Influence of the total ozone variations on changes of the level of the ultraviolet solar radiation of the UV-B range // Abstracts of the papers at the Physics. Tomsk, July 2–7, 2006. Tomsk: IAO SB RAS, 2006. P. 59.
16. *Van der A.R.J., Allaart M.A.F., Eskes H.J.* Multi sensor reanalysis of total ozone // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10, N 22. P. 11277–11294.
17. *Meteorological Service of Canada.* World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre. URL: <http://www.woudc.org>

V.V. Zuev, N.E. Zueva, E.M. Korotkova. Comparative analysis of the total ozone and UV-B radiation observation series in boreal forest zones.

The paper represents the results of the correlation analysis of observation series of total ozone and ultraviolet radiation in 300–315 nm wavelength band for temperate zone stations of Russia and Canada (Northern hemisphere, 50 N and higher) in the boreal forest zones. It is shown that the ozonosphere is the primary modulator of the biologically active UV-B radiation spectrum part in this climatic zone. Radiation amplification factors of solar UV-B spectral region are determined. It is demonstrated that 20% of total ozone depletion leads to the increase of the dose of the shortwave part of solar UV-B radiation more than twice relative to its climatic norm.