

УДК 551.510.536

Связь изменений биологически активной УФ-В солнечной радиации с колебаниями общего содержания озона

Нина Е. Зуева*

*Институт мониторинга климатических
и экологических систем СО РАН
634055 Россия, Томск, пр. Академический, 10/3¹*

Received 26.11.2008, received in revised form 3.12.2008, accepted 10.12.2008

В статье приведены результаты корреляционного анализа временных рядов общего содержания озона и приземного уровня биологически активной УФ-В солнечной радиации на длине волны 305 нм для регионов Канады в умеренных (выше 50° с.ш.) и полярных широтах.

Показано, что, несмотря на метеорологические и геофизические различия регионов и многофакторность зависимости приземной ультрафиолетовой радиации, основным модулятором изменчивости биологически активной части спектра служит озоносфера.

Выявлена высокая степень корреляции временных рядов межсуточной и среднемесячной изменчивости коротковолновой УФ-В радиации, в том числе для вегетационного периода, с колебаниями ОСО, что позволяет при отсутствии статистически обеспеченных рядов радиационных наблюдений в качестве альтернативной замены использовать временные ряды ОСО в любых регионах циркумполярной зоны.

Ключевые слова: биологически активная УФ-В радиация, спектр биологического действия, озоносфера, общее содержание озона, корреляционный анализ.

Введение

Проблема влияния солнечной коротковолновой ультрафиолетовой радиации в диапазоне длин волн 280-315 нм (УФ-В радиация) на биосферу Земли в настоящее время относится к числу наиболее актуальных. Несмотря на то, что приземный уровень УФ-В радиации значительно ниже уровня солнечной радиации более длинных волн, максимальный биологический отклик отмечен именно для этого волнового диапазона. Увеличение уровня солнечного УФ-В излучения может иметь до-

статочно серьезные последствия как для растительного, так и для животного мира, в том числе и для человека, поскольку фотоны длин волн короче 315 нм, обладающие энергией, достаточной для разрыва молекулярных связей, способны поглощаться биологическими молекулами. В результате вызванные повреждения могут иметь необратимые негативные последствия. Наиболее критичной мишенью для повреждающего действия УФ-В радиации является молекула ДНК, так как ее максимум поглощения приходится на данный диапазон

* Corresponding author E-mail address: post@imces.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

длин волн солнечного излучения, совпадая с полосами поглощения озона Хартли и Хаггинса. Поглощение УФ радиации биомолекулой может давать эффекты, которые способны сохраняться часы, месяцы или даже годы. (WHO, 1994; Kondratyev, Varotsos, 2000; Кондратьев, Федченко, 2005).

Кроме того, в северных и средних широтах длительное превышение относительно климатической нормы доз коротковолновой УФ-В радиации в течение вегетационного периода оказывает негативное влияние на фотосинтетический аппарат и увеличивает интенсивность дыхания растений. Следовательно даже незначительное подавление активности фотосинтеза лесных массивов умеренных широт приводит к дополнительному увеличению содержания CO₂ в атмосфере, поскольку в Северном полушарии сток CO₂ из атмосферы осуществляется главным образом за счет фотосинтеза в наземной растительной биоте. Основную роль в стабилизации углеродного обмена в биосфере играют бореальные леса, расположенные выше 42° с.ш.

Анализ трендов среднего глобального CO₂ показывает, что в последней четверти XX века скорость роста концентрации диоксида углерода в атмосфере существенно превышала темпы роста CO₂ только за счет выбросов в результате сгорания ископаемого углеродного топлива. Данный факт можно интерпретировать как результат влияния увеличивающейся в течение этого времени приземной УФ-В радиации, вызывающей подавление фотосинтетической активности, а следовательно, значительное ослабление ассимиляции CO₂ из атмосферы и уменьшение продуктивности лесных экосистем (Kondratyev, Varotsos, 2000).

Падающая солнечная радиация на длинах волн ультрафиолетового диапазона в значительной степени поглощается в основ-

ном кислородом, а также озоном в полосах Хартли (200 – 300 нм) и Хаггинса (300 – (340) 360 нм). По сути, озоносфера (стратосферный озоновый слой, в котором находится более 85 % всего озона) является основным природным экологическим фактором, защищающим живые организмы биосферы от губительной радиации диапазона дальнего ультрафиолета (200-280 нм) и контролирующим уровень приземной УФ-В радиации. Наиболее полной статистически обеспеченной характеристикой атмосферного озонового слоя служит общее содержание озона (ОСО) или суммарный озон (Зуев, 2004; Николайкин и др., 2004; Кузнецов, Дмитриева, 2005).

С точки зрения оценки значимости солнечного УФ излучения для биологических процессов наиболее важна дневная доза (D) УФ-В, которая рассчитывается интегрированием по всему периоду естественного освещения (Lubin *et. al.*, 1998):

$$D = \int_0^{24 \text{ hours}} \int_{280}^{400 \text{ nm}} A(\lambda) d\lambda dt, \quad (1)$$

где $A(\lambda)$ – спектр биологического действия.

Спектр биологического действия $A(\lambda)$ (рис. 1) представляет диапазон длин волн, наиболее деструктивный для данного живого организма. Он определяется экспериментально, исходя из чувствительности конкретного биологического объекта $B(\lambda)$ к воздействию УФ-В радиации, и уровня мгновенного спектрального излучения $F(\lambda)$, которое вызывает максимальные повреждения. Перемножение двух этих функций определяет спектр биологического действия.

$$A(\lambda) = B(\lambda) \times F(\lambda). \quad (2)$$

Чувствительность биологического объекта $B(\lambda)$ возрастает при смещении в коротковолновую область и выражается в относительных единицах (где 1 характеризует наивысшую

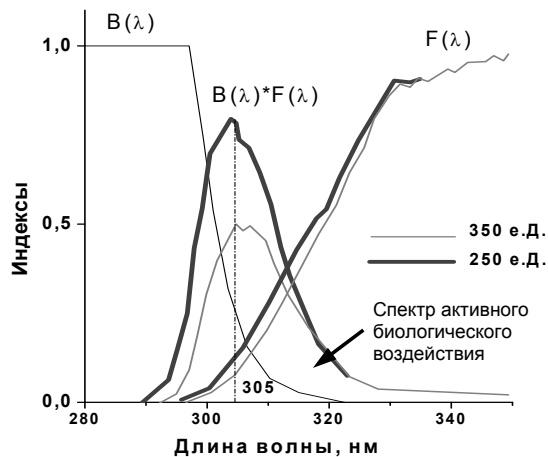


Рис. 1. Спектр активного биологического действия (по McKinlay and Diffey, 1987; Madronich and Flocke, 1997)

чувствительность). При смещении в коротковолновый спектральный диапазон степень повреждения возрастает логарифмически.

Площадь, ограниченная функцией $A(\lambda)$, представляет собой биологически активную дозу радиации в единицу времени (мгновенную дозу). Установлено, что для большинства живых организмов на Земле наиболее деструктивным является диапазон 300-310 нм. В более коротковолновом солнечном излучении в результате поглощения атмосферным кислородом и озоносферой количество высокоэнергетичных фотонов ничтожно мало, а в излучении на более длинных волнах энергии фотонов недостаточно высоки, чтобы вызвать большие повреждения биомолекул. Очевидно, что снижение ОСО на 100 е.Д. приводит к существенному росту биологически активной дозы радиации.

В случае больших истощений суммарного озона связь изменчивости доз приземной УФ-В радиации с изменениями ОСО может быть представлена уравнением (Madronich, 1993)

$$K = \ln(E_2 / E_1) / \ln((O_3)_1 / (O_3)_2), \quad (3)$$

где K – коэффициент радиационного усиления; E_1 и E_2 – два значения дозы экспозиции

УФ излучения; $(O_3)_1$ и $(O_3)_2$ – соответствующие значения ОСО.

Величину дозы экспозиции, или эффективного УФ излучения, (E) можно рассчитать, используя уравнение [Madronich, 1995; a, b]

$$E = \int F(\lambda)W(\lambda)d\lambda, \quad (4)$$

где $F(\lambda)$ – спектральное распределение падающего света; $W(\lambda)$ – весовой коэффициент действующего спектрального диапазона.

Таким образом, взаимосвязь ОСО и дозы экспозиции УФ-В радиации носит экспоненциальный характер, и в результате поглощения озоном приземный уровень солнечного УФ-В излучения уменьшается логарифмически.

В упрощенном виде при истощении стратосферного озона до 40-45 % взаимосвязь между изменениями ОСО (ΔO_3) и изменчивостью дозы экспозиции УФ-В радиации (ΔE) можно описать уравнением (Madronich, S. and Flocke, S. 1997; Kondratyev, Varotsos, 2000)

$$K = -(\Delta E / E) / (\Delta O_3 / O_3), \quad (5)$$

Известно, что интенсивность дошедшей до поверхности Земли солнечной ультрафиолетовой радиации зависит от поглощения атмосферным озоном и другими газовыми

компонентами, а также от рассеяния на молекулах воздуха и аэрозолях. В отсутствие облачности ее уровень определяется преимущественно общим содержанием озона (Гущин, Виноградова, 1983).

Анализ связи временных рядов суточных и среднемесячных значений ОСО и биологически активной УФ-В радиации ($\lambda \leq 310$ нм) показал, что для внутриконтинентального региона Северной Америки выше 50° с.ш., где достаточно высокий уровень ОСО обусловлен главным образом динамикой атмосферы, несмотря на влияние прочих факторов, вариации УФ-В радиации модулируются колебаниями ОСО (Зуев, Зуева, 2006). Между этими параметрами существует статистически высокий уровень корреляции (с доверительной вероятностью выше 0,99). В то же время было определено, что степень корреляции зависит от широтного расположения, континентальности региона и его климатических условий.

Следовательно, корреляционный анализ временных рядов ОСО и коротковолновой УФ-В радиации, выполненный для возможно большего числа станций наблюдений, позволит определить пространственное поле, для которого в исследованиях влияния коротковолновой УФ-В радиации на биологические объекты, при отсутствии достоверных непре-

рывных длительных рядов радиационных наблюдений, в качестве альтернативной замены могут быть использованы временные ряды ОСО. Кроме того, проведение подобных исследований позволит определить пространственные границы регионов, для которых возможно использование дендрохронологического сигнала для восстановления поведения озоносферы и анализа долгопериодных колебаний ОСО.

Влияние состояния озоносферы на фотосинтетический аппарат растений и, как следствие, на ассимиляцию CO_2 и изменения ростовых характеристик растений носит опосредованный характер (рис. 2).

Тем не менее, установлено, что между ОСО за вегетационный период и плотностью годовых колец темнохвойных пород деревьев (пихты, ели, кедровой сосны) существует статистически высокий уровень корреляции, что позволило разработать методику восстановления ОСО на основе дендрохронологического сигнала (Зуев, Бондаренко, 2002, 2003, 2007). Таким образом, появилась возможность осуществить реконструкцию поведения ОСО до нескольких веков в прошлое, поскольку длительность большинства рядов наблюдений ОСО не превышает 40-50 лет, что существенно затрудняет анализ долгопериодных изменений состояния озоносферы.

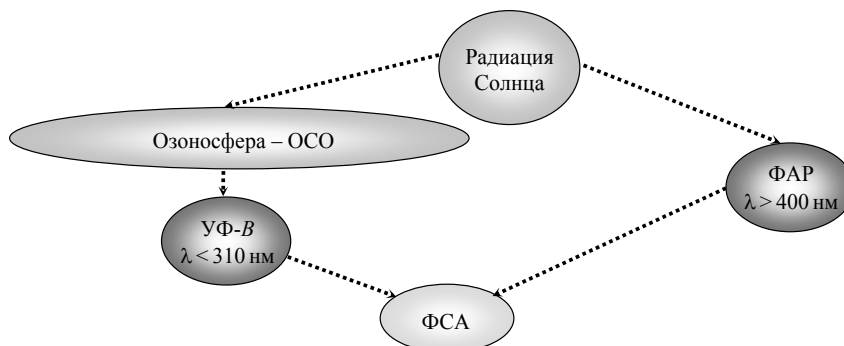


Рис. 2. Общая схема влияния изменений ОСО на фотосинтетический аппарат растений (стрелками показано воздействие световыми квантами; ФАР – фотосинтетически активная радиация)

Результаты корреляционного анализа временных рядов суммарного озона и биологически активной УФ-В радиации

Биологические объекты наших исследований связаны преимущественно с регионами, расположенными в умеренных и субарктических широтах Северного полушария. Погрешности спутниковых измерений уровня приземной коротковолновой УФ-В радиации достаточно велики, поэтому для корректного проведения анализа использованы данные станций наземного базирования Канады (по данным сайта http://www.woudc.org/data/MetaQuery/metaquery_e.cfm). Выбор региона обусловлен тем, что не только на территории Сибири, но и в России нет ни одной станции, где были бы получены статистически обеспеченные ряды наблюдений солнечной УФ-В радиации диапазона длин волн 300-310 нм, а климатические условия Канады в достаточной степени сопоставимы с условиями Сибири и Дальнего Востока. Для анализа были сформированы ряды среднесуточных значений УФ радиации на длине волны 305 нм (УФ-В₃₀₅), поскольку этому значению практически соответствует максимум спек-

тра биологического действия. Ряды суточных значений ОСО были получены по данным космического мониторинга (по данным сайта <http://toms.gsfc.nasa.gov/>).

Расположение станций Канады схематично показано на рис.3, где также обозначено местоположение Томска (Россия) и Кагосимы (Япония). Очевидно, что станции Саскатун, Эдмонтон, Гус-Бей, Черчилл по своему широтному расположению близки Томску (50-60° с.ш.).

Данные наземных измерений по Кагосиме были опубликованы ранее и здесь приведены для сравнения. Отметим, что этот регион характеризуется более низким уровнем суммарного озона, который определяется преимущественно фотохимическими реакциями. По сравнению с регионами циркумполярной зоны здесь значимую роль в регуляции приземного уровня УФ-В₃₀₅ радиации играет фактор аэрозольно-облачного влияния.

Географические координаты, данные о длительности рядов наблюдений, климате, среднегодовом количестве осадков выбранных регионов приведены в табл. 1.

Выбор рядов наблюдений существенно затруднен тем, что для интересующего нас

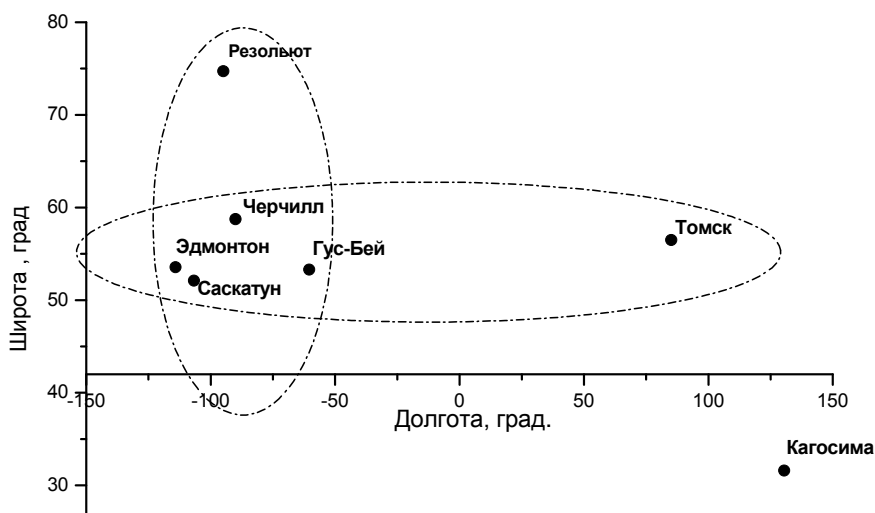


Рис. 3. Схема местоположения станций мониторинга коротковолновой УФ-В радиации в циркумполярной зоне Канады; выделены станции, расположенные на широтах, близких к широтному положению Томска

региона они, как правило, короткие и фрагментарные, что, в первую очередь, не позволяет корректно определить климатическую норму поведения анализируемого параметра. К сожалению, необходимо констатировать, что выбранные ряды, не в полной мере статистически однородны. Наглядно проявляется фрагментарность спутниковых измерений ОСО. Фактически речь идет о полном или частичном отсутствии данных 1991-1997 гг. – периода глобального истощения стратосферного озона, связанного с вулканогенной депрессией атмосферы, имеющего для наших исследований первостепенное значение.

Отметим, что для станции Резольют отсутствуют данные наблюдений ОСО и УФ- B_{305} в зимний период с ноября по февраль.

Колебания как ОСО, так и приземного уровня УФ-В радиации на (E), имеют ярко выраженный годовой ход. На рис. 4 показаны климатические нормы (многолетнее среднее) исследуемых параметров регионов Канады, рассчитанные за период наблюдений по среднемесячным значениям. Точность задания климатической нормы, определяемая как длиной временного ряда, так и регулярностью наблюдений, существенно влияет на корректность результатов корреляционного анализа.

Известно, что распределение суммарного озона и приземной солнечной радиации имеет выраженную зависимость от географической широты региона. Кроме того, многолетние наблюдения показали, что и поле ОСО, и поле УФ радиации подвержены значительным пространственно-временным вариациям. В умеренных и полярных широтах стратосферный озон является, по сути, пассивным трассером циркуляционных процессов в атмосфере. Как правило, низкое содержание озона связано с формированием малоподвижного высокого антициклона или барического гребня и выносом теплой воздушной массы, обедненной озоном, а высокое – с формированием циклона, т.е. с высотной ложбиной и выносом холодной воздушной массы с более высоким содержанием озона (Зуев, 2004). Поле УФ радиации формируется под влиянием, в том числе, таких факторов, как циркуляционные атмосферные процессы, состояние озонового слоя, облачный и аэрозольный режим атмосферы, степень континентальности (Михалев и др., 2004).

Максимальная изменчивость ОСО наблюдается в период зимне-весенней перестройки атмосферы, УФ- B_{305} – в летние месяцы.

При ординарной в целом тенденции изменений весьма специфично поведение климатической нормы ОСО (рис. 4а) и уровня

Таблица 1. Географические координаты, длительность рядов наблюдений, климат и количество осадков станций наземного мониторинга приземной УФ-В радиации на территории Канады (приведены данные для Томска и Кагосимы)

| Регион | Географические координаты | Период наблюдений | Климат | Количество осадков, мм/год |
|----------|---------------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|
| Саскатун | 52,11 с.ш.; 106,71 з.д. | 1991-2002 | резко континентальный | 350 |
| Гус-Бей | 53,30 с.ш.; 60,36 з.д. | 1997-2005 | умеренный морской | 914 |
| Эдмонтон | 53,55 с.ш.; 114,10 з.д. | 1992-2006 | резко континентальный | 477 |
| Черчилл | 58,75 с.ш.; 94,07 з.д. | 1992-2006 | субарктический | 430 |
| Резольют | 74,72 с.ш.; 94,98 з.д. | 1991-2004 | арктический | 140 |
| Томск | 56,50 с.ш.; 85,10 в.д. | - | континентальный | 400-550 |
| Кагосима | 31,58 с.ш.; 130,56 в.д. | 1991-2001 | субтропический, муссонный | более 2000 |

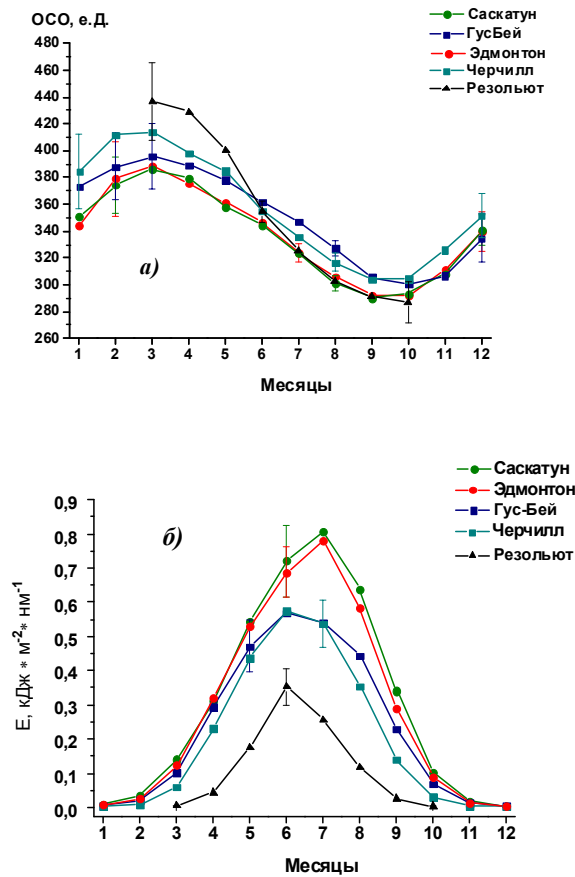


Рис. 4. Климатические нормы СОС (а) и УФ-В радиации на длине волны 305 нм (б) исследуемых регионов Канады; показаны месяцы с максимальными и минимальными значениями СКО (σ)

приземной УФ-В радиации (рис. 4б), полученных для станции Гус-Бей. Среднеклиматическая норма СОС здесь несколько выше, чем для Эдмонта, расположенного фактически на той же широте.

Еще более существен тот факт, что уровень приземной УФ-В₃₀₅ радиации, регистрируемый на станции Гус-Бей в весенне-осенний период, значительно ниже, чем для расположенного фактически на той же широте Эдмонта, а в летний период не превышает значений, характерных для Черчилла, расположенного на 5,45° севернее. Широтные аномалии связаны с тем, что Гус-Бей в течение всего года находится под влиянием одного из постоянных центров действия атмосферы – Исландской депрессии (подробно на сайте <http://slovari.yandex.ru/dict/>

bse/article/00088/07500.htm). Кроме того, низкие относительно широтной нормы значения коротковолновой УФ-В₃₀₅ радиации в летний период связаны со значимым вкладом в ее ослабление аэрозольно-облачной компоненты, о чем свидетельствует достаточно высокое среднегодовое количество осадков (табл. 1).

Обращает на себя внимание тождественность многолетней нормы СОС и УФ-В радиации Саскатуна и Эдмонта, расположенных фактически в поле однородности СОС (Бондаренко и др., 2004). Можно также отметить, что для Саскатуна и Эдмонта максимум средней многолетней нормы УФ-В приходится на июль, в то время как климатический максимум для станций Гус-Бей, Черчилл и Резольют наблюдается в июне.

Для анализируемых временных рядов среднесуточных значений за период наблюдений многолетняя норма была получена с применением процедуры сглаживания FFT-фильтром.

Очевидно, что климатические нормы рассматриваемых рядов ОСО и УФ-В радиации имеют существенный временной сдвиг. Поэтому при анализе влияния суточных и среднемесячных колебаний ОСО на изменчивость уровня приземной УФ-В₃₀₅ радиации годовой ход был исключен, ряды нормированы и выражены в относительных единицах по формуле

$$I_i(t) = \frac{[X_i(t) - \bar{X}_i(t)]}{X_i(t)}, \quad (6)$$

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

Временные ряды относительных отклонений ОСО и УФ-В₃₀₅ имеют разнонаправленные тенденции. Поэтому при анализе корреляции было произведено вычитание трендов.

Оценка статистической значимости полученных результатов выполнялась по t -критерию Стьюдента.

В табл. 2 приведены коэффициенты корреляции (R) временных рядов среднесуточных отклонений ОСО и УФ-В₃₀₅ за полный период наблюдений, указаны возможные временные границы вегетационного периода, приведены коэффициенты корреляции в рамках указанного периода.

Очевидно, что в регионах умеренных широт Северного полушария, выше 50° с.ш., вне зависимости от метеорологических и гелиогеофизических факторов основным модулятором межсуточной изменчивости биологически активной УФ-В₃₀₅ радиации служит озоносфера. Для всех станций Канады модуль коэффициента корреляции существенно (для

внутриконтинентальной части более чем в 2 раза) превышает его значение для Кагосимы, расположенной ниже 40° с.ш. Статистически высокая корреляция сохраняется и для вегетационного периода.

Обращает на себя внимание тот факт, что для внутриконтинентальных регионов, расположенных в поле однородности ОСО, Саскатун и Эдмонтон, степень корреляции временных рядов суточных отклонений ОСО и УФ-В₃₀₅ фактически одинакова, в том числе и для вегетационного периода.

На рис. 5 для указанных регионов приведены месячные нормы осадков. Очевидно, что количество осадков в Эдмонтоне превышает среднюю норму осадков в Саскатуне (табл. 1), причем наиболее значимо в течение вегетационного периода. Идентичность коэффициентов корреляции свидетельствует о том, что ОСО является превалирующим фактором, модулирующим изменчивость приземного уровня биологически активной УФ-В радиации.

Анализ полученных результатов показал, что для весны характерны значительные всплески доз УФ-В₃₀₅ радиации, появление которых всегда связано с кратковременным спадом ОСО во время зимне-весенней перестройки стратосферы. Летом существенную роль в дополнительном ослаблении приземного уровня УФ-В₃₀₅ наряду с ОСО могут играть туманы.

На станции Резольют в периоды весенней перестройки атмосферы с 1995 по 1997 гг. наблюдалось мощное фрагментарное повышение относительно многолетней нормы доз УФ-В₃₀₅ радиации, превышающий уровень 4σ. На основании вышесказанного можно полагать, что эти всплески были спровоцированы существенными спадами ОСО. Однако отсутствие для этого периода данных об уровне суммарного озона не позволяет делать однозначных выводов.

Таблица 2. Результаты корреляционного анализа рядов относительных отклонений суточных значений ОСО и приземной УФ-В₃₀₅ радиации за полный период наблюдений и в рамках временных границ вегетационного периода

| Регион | R (полный период) | SD | N (выборка) | Вегетационный период | R (вегетационный период) | SD | N (выборка) |
|----------|-------------------|-------|-------------|----------------------|--------------------------|-------|-------------|
| Саскатун | -0,717 | 0,065 | 2886 | IV-X | -0,672 | 0,060 | 1724 |
| Гус-Бей | -0,525 | 0,091 | 2904 | IV-IX | -0,406 | 0,077 | 1475 |
| Эдмонтон | -0,706 | 0,069 | 3937 | IV-X | -0,663 | 0,061 | 2316 |
| Черчилл | -0,567 | 0,080 | 3056 | V-IX | -0,422 | 0,068 | 1315 |
| Резольют | -0,536 | 0,289 | 2135 | VII | не определен | - | - |
| Кагосима | -0,310 | | 3613 | не ограничен | -0,250 (IV-IX) | - | 1753 |

Примечание. Для всех регионов уровень значимости $p < 0,0001$; SD – стандартное отклонение

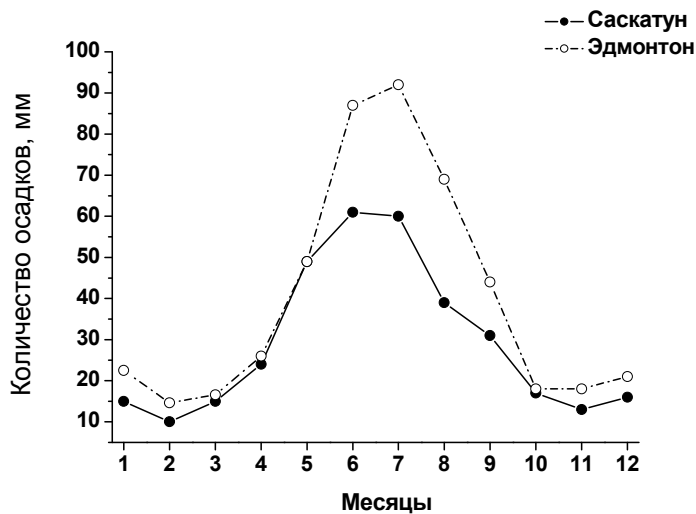


Рис. 5. Среднемесячные нормы осадков для регионов Саскатун и Эдмонтон (Канада)

Безусловно, выработанные в процессе эволюции адаптационные свойства дают возможность живым организмам ослаблять негативное влияние кратковременно, около 5-7 дней (Зуев, 2000), повышения доз приземной УФ-В радиации. К серьезным нарушениям физиологических, биохимических и макромолекулярных процессов приводит достаточно длительное перманентное воздействие. Поэтому большую значимость имеют флуктуации среднемесячных значений коротковолновой УФ-В радиации. Подобное усреднение позволяет выделить долгопериодные коле-

бания, дает возможность выявить основные тенденции. Кроме того, усреднение данных в рамках одного месяца позволяет ослабить аэрозольно-облачный фактор, что особенно актуально в тех случаях, когда речь идет об использовании временных рядов ОСО при анализе воздействия биологически активной УФ радиации.

В табл. 3 приведены коэффициенты корреляции рядов относительных отклонений среднемесячных значений ОСО и приземного уровня УФ-В₃₀₅ радиации за полный и вегетационный периоды наблюдений. Необходимо

Таблица 3. Результаты корреляционного анализа рядов относительных отклонений среднемесячных значений ОСО и приземного уровня УФ-В₃₀₅ радиации за полный и вегетационный периоды наблюдений

| Регион | R (полный период) | SD | N (выборка) | Вегетационный период | R (вегетационный период) | SD | N (выборка) |
|----------|----------------------|-------|----------------|----------------------|-----------------------------|-------|----------------|
| Саскатун | -0,717 | 0,136 | 103 | IV-X | -0,667 | 0,100 | 61 |
| Гус-Бей | -0,7646 | 0,115 | 110 | IV-IX | -0,679 | 0,090 | 55 |
| Эдмонтон | -0,709 | 0,031 | 135 | IV-X | -0,760 | 0,022 | 82 |
| Черчилл | -0,673 | 0,141 | 109 | V-IX | не определен | - | - |
| Резольют | -0,522 | 0,131 | 72 | VII | не определен | - | - |
| Кагосима | -0,500 | - | 130 | не ограничен | 0,380 (IV-IX) | - | 64 |

учесть, что по сравнению с рядами суточных значений выборка уменьшается более чем на порядок величины. В этом случае существенно возрастает роль точности определения многолетнего среднего исследуемого параметра, определяемого длительностью и регулярностью наблюдений.

Статистически высокая корреляция исследуемых параметров очевидна. Для полного периода наблюдений явно прослеживается зависимость коэффициента корреляции от географической широты региона (табл. 1). При этом для регионов, расположенных в одном широтном диапазоне (выделено в табл. 3 темно-серым цветом), максимальным коэффициентом корреляции характеризуется Гус-Бей – регион с максимальным количеством осадков в течение года, однако с наиболее полно представленными рядами данных. Уменьшение степени коррелированности параметров в зависимости от широтного расположения региона наблюдений связано, прежде всего, с выраженным спадом приземного уровня УФ радиации по мере смещения в область более высоких широт (рис. 1).

Для вегетационного периода Черчилла корреляционный анализ выполнить не представляется возможным в связи с фрагментарностью данных и необходимостью учитывать

ярко выраженную сезонную зависимость исследуемых параметров.

В качестве примера на рис.6 приведены временные ряды относительных отклонений среднемесячных значений ОСО и УФ-В₃₀₅ станции Гус-Бей.

Заключение

В ходе исследования влияния колебаний ОСО на приземный уровень УФ-В радиации был выполнен корреляционный анализ временных рядов суточных и среднемесячных рядов ОСО и УФ-В₃₀₅ пяти регионов Канады, выбор которых обусловлен в первую очередь их географическим положением и различием климатических условий, в том числе и аэрозольно-облачного состояния атмосферы. Полученные результаты однозначно показывают, что в регионах умеренных широт Северного полушария, выше 50° с.ш., вне зависимости от метеорологических и геофизических факторов генеральным модулятором межсуточной изменчивости биологически активной УФ-В₃₀₅ радиации является озоносфера. Следовательно, использование данных об общем содержании озона при анализе влияния коротковолновой части спектра УФ-В радиации на биологические объекты в регионах циркумполярной зоны достаточно обосновано.

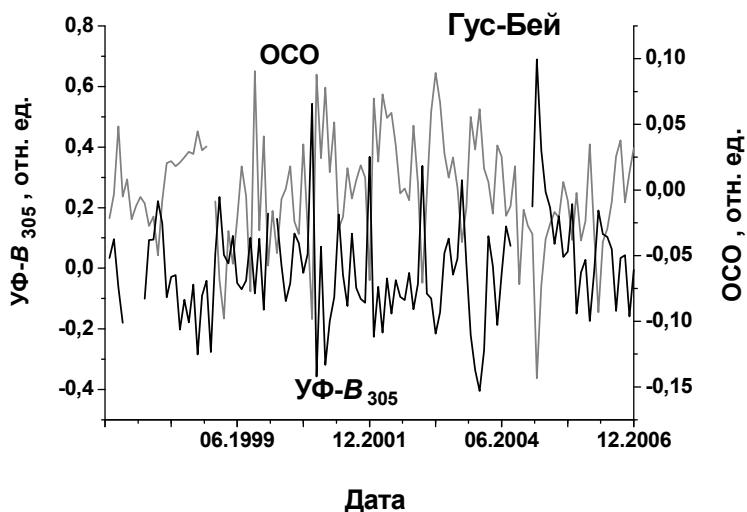


Рис. 6. Временные ряды относительных отклонений среднемесячных значений ОСО (светлая линия) и УФ-В₃₀₅ (темная линия) станции Гус-Бей

Существенный рост приземного уровня биологически активной УФ-В радиации является результатом длительной депрессии стратосферного озона. В итоге подавляется фотосинтетическая активность наземных и водных экосистем, снижаются поглощательные свойства Мирового океана, что способствует ускорению роста в атмосфере Земли

диоксида углерода. При создании климатических моделей долговременное глобальное истощение стратосферного озона необходимо учитывать в числе факторов, которые имеют первостепенное значение в цикле углерода и определяют направления и амплитуды потоков CO₂ между атмосферой, наземными экосистемами и Мировым океаном.

Работа выполнена при финансовой поддержке по гранту РФФИ №08-05-00558-а.

Список литературы

- Бондаренко С.Л., Зуев В.В., Бондаренко М.А. (2004) Анализ и прогноз пространственно-временного распределения общего содержания озона по спутниковым и реконструированным данным для территории Западной Сибири // География и природные ресурсы. Специальный выпуск: 108-111.
- Гущин Г.П., Виноградова Н.Н. (1983) Суммарный озон в атмосфере, Л., Гидрометеиздат, 237 с.
- Зуев В.В. (2000) Дистанционный оптический контроль стратосферных изменений, Томск, МГП «РАСКО», 140 с.
- Зуев В.В. (2004) Лидарный контроль стратосферы, Новосибирск, Наука, 307 с.
- Зуев В.В., Бондаренко С.Л. (2003) Реконструкция многовекового хода общего содержания озона на основе дендрохронологических данных // Доклады Академии наук, т. 392, № 5: 682-385.
- Зуев В.В., Бондаренко С.Л. (2002) Реконструкция палеоповедения озонового слоя из дендрохронологических данных с использованием спутниковых данных TOMS // Исследование Земли из космоса. 6: 48-53.

Зуев В.В., Бондаренко С.Л. (2007) Исследование озоносферы методами дендрохронологии. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 160 с.

Зуев В.В., Зуева Н.Е. (2006) Влияние вариаций суммарного озона на изменение уровня солнечной УФ-В радиации // Оптика атмосферы и океана, 2006. Т.19. №12: 1053-1061.

Кондратьев К.Я., Федченко П.П. (2005) Влияние спектра солнечной радиации на эволюцию биосферы // Вестник Российской академии наук. Т. 75. №. 6: 522-532.

Кузнецов В.В., Дмитриева Г.А. (2005) Физиология растений. М.: Высшая школа, 737 с.

Михалев А.В., Тащилин М.А., Черниговская М.А. (2004) Пространственные и временные вариации эритемной ультрафиолетовой радиации по данным спутника EARTH PROBE // Солнечно-земная физика, 2004. Вып. 5. С. 128-130.

Николайкин Н.И., Николайкина Н.Е., Мелехова О.П. (2004) Экология. М.: Дрофа, 624 с.

Kondratyev K.Ya., Varotsos C.A. (2000) Atmospheric Ozone Variability: Implications for Climate Change, Human Health and Ecosystems. Chichester U.K.: Springer PRAXIS, 617 p.

Lubin D., Jensen E.H., Gies H.P. (1998) Global surface ultraviolet radiation climatology from TOMS and ERBE data // J. Geophys. Res. 103. № 20:26061-26091.

Madronich S. (1993) UV radiation in natural and perturbed atmosphere In: Environmental Effects of Ultraviolet Radiation. M. Tevini (ed.). Lewis Publ. Boca Raton, FL., 1769 p.

Madronich S., McKenzie R., Caldwell M.M., Bjoern L.O. (1995) Changes in ultraviolet radiation reaching the Earth's surface. Ambio. 24, p.143-152

Madronich, S. and Flocke, S. (1997) Theoretical estimation of biologically effective UV radiation at the Earth's surface. In Solar Ultraviolet Radiation – Modeling, Measurements and Effects, in: Zerefos, C, Bais A.F. (eds.), NATO ASI Series. Vol. I52, Springer-Verlag, Berlin.

McKinley A. F., Diffey B.L. (1987) A reference action spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin // CIE J., 6: 17 – 22.

Ultraviolet Radiation. An Authoritative Scientific Review in Environmental and Health Effects of UV, with Reference to Global Ozone Layer Depletion. Environmental Health Criteria (1994). Geneva, Switzerland, WHO 160.

The Correlation of Biological Active UVB Solar Radiation Variability with Total Ozone Content Oscillation

Nina E. Zueva

*Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems,
Siberian Branch of the Russian Academy of Science
10/3 Akademicheskyy, Tomsk, 634055 Russia*

The correlation analysis results of TOC time series and the surface biological active UVB radiation at wavelength 305 nm for Canadian regions in circumpolar (above 50°N) latitude are given in the article.

The ozonosphere is determined as a basic variability modulator of the biological active UVB radiation in spite of the meteorological and geophysical difference of the regions and the complex dependence of the surface UV radiation.

The high level correlation of daily and monthly variability time series of short wavelength UVB radiation, including growing season, with TOC oscillation is shown. This makes it possible to use TOC time series in the absence there of statically provided series of radiative monitoring in the capacity of alternative change in any region of circumpolar zone.

Keywords: bioactive UVB radiation, biological action spectrum, ozonosphere, total ozone content, correlation analysis.
