

УДК 551.521.17

Динамика солнечной УФ–В- и УФ–А-радиации в Томске во время озоновой аномалии весной 2011 г.

Г.А. Ивлев¹, Б.Д. Белан¹, В.М. Дорохов^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Центральная аэрологическая обсерватория
141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

Поступила в редакцию 13.05.2013 г.

Представлены результаты многолетних наблюдений солнечной УФ–В- и общей радиации в г. Томске (56,5° с.ш., 85,1° в.д.) в 2003–2012 гг. Общая солнечная радиация измерялась пиранометром Янишевского М-115М, УФ–В-радиация – пиранометром UVB-1. Для наблюдений ОСО и спектральных измерений интенсивности УФ-радиации применялся спектрофотометр Brewer MKIV S/N 049. Проведено обсуждение результатов измерений солнечной радиации и ОСО в период появления и развития отрицательной озоновой аномалии весной 2011 г. Результаты спектральных измерений УФ–В-, УФ–А-радиации и ОСО, полученные в период озоновой аномалии 2011 г., сравнены с данными наблюдений в аналогичный период 2010 г. Данные 2010 г. по ОСО и УФ-радиации были взяты как наиболее близкие к средним многолетним значениям в г. Томске для сравниваемых дней. В 2011 г. в рассматриваемый период превышение значений суточной дозы УФ–В-радиации достигало 40%, а эритемной радиации 36%. Показано, что основной вклад в увеличение уровня приземной УФ-радиации внесло значительное понижение ОСО относительно многолетней нормы. Также выявлено, что для отдельных областей спектра 290–325 нм влияние таких факторов, как облачность и альbedo подстилающей поверхности, могло частично или полностью компенсировать возможный рост УФ-радиации, вызванный значительным падением ОСО.

Ключевые слова: атмосфера, озон, спектрофотометр, УФ–В-радиация; atmosphere, ozone, spectrophotometer, UV–B radiation.

Введение

Ультрафиолетовая (УФ) радиация оказывает существенное воздействие на земные и водные экосистемы, влияет на качество воздуха, биогеохимические циклы и в значительной степени на здоровье человека. Известно, что человек чутко реагирует на изменение количества приходящей УФ-радиации. Небольшие дозы ультрафиолетовой радиации благотворно сказываются на здоровье людей, способствуя формированию витамина D3, регулирующего обмен кальция и фосфора в организме человека. В то же время значительное облучение может вызывать и различные заболевания кожи, глаз, иммунной системы.

Вариации приземной УФ-радиации определяются временем года, зенитным углом Солнца (ZA) и его активностью, альbedo подстилающей поверхности, состоянием атмосферы, облачным покровом, составом и концентрацией атмосферного аэрозоля, газовыми составляющими атмосферы, общим содержанием озона и его вертикальным распределением. Воздействие каждого из этих факторов на приток солнечной УФ-радиации различается не только в разных регионах планеты, но и внутри региона.

* Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Валерий Михайлович Дорохов.

В мире существует сеть станций, на которых ведется мониторинг солнечной ультрафиолетовой радиации (http://www.woudc.org/data/metadata/platform_e.html). В нее входит и ряд российских станций. В частности, на территории России и стран СНГ имеется небольшая сеть станций УФ-мониторинга, использующая спектрофотометры Brewer. С помощью спектрофотометра Brewer модели MKII S/N 043 ведутся регулярные измерения общего содержания озона (ОСО) и спектрального потока солнечной УФ-радиации (280–325 нм) на Кисловодской высокогорной научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (43,7° с.ш., 42,7° в.д.). В г. Обнинске (55,1° с.ш., 36,6° в.д.) проводятся регулярные наблюдения ОСО и солнечной УФ-радиации на станции Института экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун» с помощью спектрофотометра Brewer MKII S/N 044. В ИОА СО РАН измерения с помощью спектрофотометра Brewer MKIV S/N 049 начаты осенью 2003 г. В 1990–1994 гг. этот прибор использовался нами на о. Хейса, Земля Франца-Иосифа (81,6° с.ш., 58,1° в.д.), для наблюдений общего содержания озона и двуокиси азота. Измерения ОСО проводились по солнечному излучению, а в период полярной ночи выполнялись измерения озона по Луне [1–3]. Результаты этих наблюдений представлены в базе данных WOUDC.

В настоящей статье представлены результаты наблюдений биологически активной солнечной ультрафиолетовой радиации и общего содержания атмосферного озона в г. Томске, полученные с помощью автоматизированного спектрофотометра Brewer. Кроме того, анализируются и обсуждаются данные измерений солнечной УФ-В- и коротковолновой области УФ-А-радиации во время появления и развития отрицательной аномалии озона в зимне-весенний период 2011 г., а также сравниваются результаты измерений озона и ультрафиолетовой солнечной радиации 2011 г. с данными спектральных наблюдений в весенний период 2010 г.

1. Спектрофотометр Brewer

Спектрофотометр Brewer MKIV S/N 049 измеряет общее содержание озона и интенсивность солнечной УФ-радиации, точность задания длины волны составляет $(0,006 \pm 0,002)$ нм. При измерении потока УФ-излучения сканирование происходит с шагом 0,5 нм в диапазоне длин волн λ от 290 до 325 нм. За время 5 мин 25 с спектрофотометром производится двойное сканирование данного спектрального диапазона с получением двух значений на каждой длине волны. Итоговым результатом является спектр из среднеарифметических значений интенсивности в диапазоне 290–325 нм. При измерении ОСО по прямому Солнцу и в зените неба время начала каждого следующего измерения, производимого прибором, не постоянно.

Расписание выполнения отдельных команд задается оператором в определенных зенитных углах Солнца. Когда достигается заданное значение зенитного угла Солнца, спектрофотометр начинает выполнять последовательность команд, определяющих вид и порядок измерений. В этот период измерения УФ-радиации чередуются с измерением ОСО либо внутренними калибровками прибора. Программное обеспечение позволяет получать как спектральное распределение УФ-радиации, так и интегральные значения в заданной области спектра. Спектрофотометр проходил плановое техническое обслуживание и участвовал в четырех калибровках российских приборов Brewer по вторичному канадскому передвижному эталону Brewer MKII S/N 017, выполненных в НПО «Тайфун» в г. Обнинске. Последняя калибровка проведена в сентябре 2012 г.

В Томске на крыше здания Станции высотного зондирования ИОА СО РАН (СВЗ), где установлен прибор, помимо измерения УФ-радиации спектрофотометром Brewer с осени 2002 г. осуществляются измерения УФ-радиации пиранометром UVB-1 (Yankee environmental systems, Inc.). Значения напряжения, снимаемые АЦП с аналогового выхода UVB-1, позволяют рассчитывать приходящую общую УФ-радиацию в двух диапазонах: 280–315 либо 280–320 нм. В настоящей статье мы используем многолетний ряд УФ-В-радиации, полученный данным прибором в первом диапазоне длин волн. Параллельно на СВЗ проводятся измерения общей при-

ходящей солнечной радиации в диапазоне длин волн 300–2400 нм пиранометром Янишевского М-115М.

2. Многолетний ход интегральной и УФ-В-радиации в г. Томске

Наблюдения озона и спектральных потоков солнечной УФ-В-радиации в Томске проводятся регулярно с сентября 2003 г. [4]. Весной 2011 г. были зафиксированы очень низкие значения ОСО и повышенные дозы ультрафиолетовой радиации в области УФ-В. Этому способствовала озоновая аномалия в Арктике в марте и апреле 2011 г. [5–11]. Она регистрировалась спутниковым прибором AURA, электрохимическими озонозондами ЕСС, фильтровым озонометром М-124, спектрофотометром Brewer и привела к 30%-м потерям ОСО в полярных и умеренных широтах Северного полушария. Над г. Томском необычайно низкие значения ОСО отмечались во второй декаде апреля 2011 г. Поскольку общее содержание озона в значительной степени определяет приток УФ-В-радиации к поверхности Земли, то представляет определенный интерес исследование его изменения в этот период. По имеющимся данным ежечасных наблюдений суммарной и УФ-В-радиации были рассчитаны месячные суммы приходящей солнечной энергии (рис. 1, точки на кривых 1). Здесь также показаны нисходящие тренды за 10 лет наших наблюдений в период 2003–2012 гг.

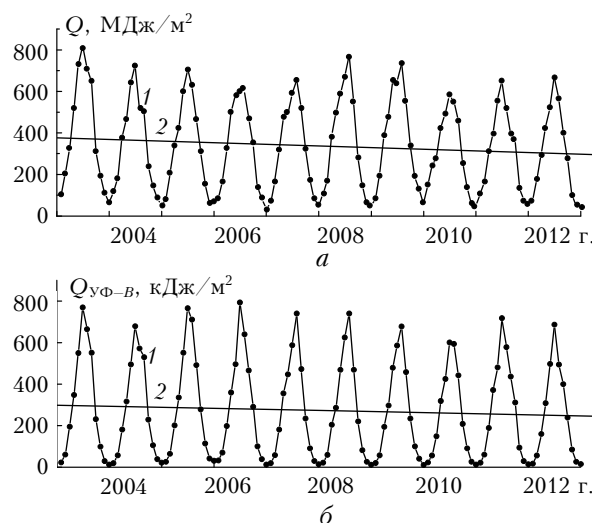


Рис. 1. Межгодовая изменчивость месячных сумм: а – суммарной радиации в г. Томске (1 – $Q_{300-2400}$ нм; 2 – тренд $-0,65196 + 0,5851$); б – УФ-В-радиации в г. Томске (1 – $Q_{280-315}$ нм; 2 – тренд $-0,42176 + 0,63105$)

Из рис. 1 видно, что в среднем приход УФ-В-радиации был меньше на 3 порядка по сравнению с приходящей суммарной солнечной радиацией. То есть вклад УФ-В-радиации в рассматриваемом диапазоне 280–315 нм в 1000 раз меньше притока суммарной солнечной радиации в интервале 300–2400 нм. Для определения вклада УФ-В-радиации в общую

приходящую солнечную радиацию месячные суммы приходящей УФ-В-радиации ($\Sigma Q_{УФ-В}$) поделены на месячные суммы общей приходящей солнечной радиации (ΣQ). Эти значения отнормированы на безразмерный коэффициент K таким образом, чтобы среднее арифметическое полученных значений за 10 лет было равно единице. Эти значения называем относительной долей УФ-В-радиации и обозначим как $ОД_{УФ-В}$.

На рис. 2 представлен годовой ход $ОД_{УФ-В}$. Максимальный вклад отмечается в летние месяцы, а минимальный в зимний период. При этом переход от одного сезона к другому происходит достаточно монотонно и отношения внутри одного года от месяца к месяцу возрастают и убывают последовательно. В апреле 2011 г. хорошо виден пик, который превышает значения мая этого же года. По времени он совпадает с появлением арктической озоновой аномалии весной этого года. И именно в апреле над г. Томском отмечалось значительное понижение ОСО [6, 8, 11].

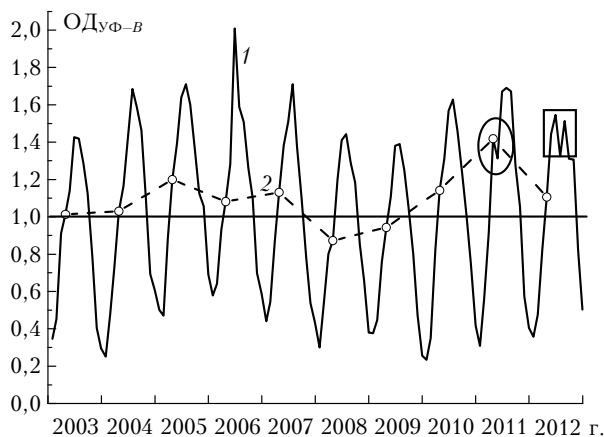


Рис. 2. Межгодовая изменчивость относительной доли УФ-В-радиации в г. Томске: 1 – $ОД_{УФ-В}$ для всех месяцев года; 2 – $ОД_{УФ-В}$ для апреля. Овалом выделен период озоновой аномалии весной 2011 г., а квадратом период летних пожаров 2012 г.

На рис. 2 обращает на себя внимание также нестандартное поведение $ОД_{УФ-В}$ летом 2012 г. Ситуация в 2012 г. объясняется сильными летними лесными пожарами в районе Томска, очаги которых располагались недалеко от пункта наблюдений. В ноябре 2012 г. на заседании рабочей группы «Аэрозоли Сибири» данной теме было посвящено достаточное количество докладов [12–18].

3. Изменение притока УФ-В-радиации в период озоновой аномалии 2011 г.

Для анализа изменений УФ-В-радиации было выбрано 2 дня: 19 апреля 2011 и 19 апреля 2010 гг. Из них – 19 апреля 2011 г. является самым малооблачным днем с минимальным среднедневным значением ОСО за период присутствия с 5 по 26 апреля над Томском озоновой аномалии, а 19 апреля

2010 г. – самым малооблачным из оставшихся 9 дней 19 апреля за 10 лет измерений с непрерывным рядом измерений ОСО и УФ-радиации в течение дня. При этом разница между среднедневными значениями для ОСО составляла более 100 е.Д.; аэрозольная оптическая толща (АОТ) на длине волны 320,1 нм изменилась всего на 5%; приземное давление менее 1%, воздушная масса атмосферы для двух пар околополуденных измерений в 12:59 и 13:47 местного времени осталась такой же (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики ОСО и УФ-В-радиации в сопоставляемые периоды

Дата	Среднедневное значение ОСО, е.Д.	Среднедневное значение АОТ, $\lambda = 320,1$ нм	Приземное давление в период проведения измерений, гПа	Масса атмосферы* в 12:59/13:47
19.04.2010	403,9	0,42	1007,0	1,422/1,428
19.04.2011	299,5	0,40	997,3	1,423/1,428

* Под термином «масса атмосферы» понимается отношение оптической толщи атмосферы, проходимой прямой солнечной радиацией во время измерений, к оптической толще атмосферы при положении Солнца в зените.

На рис. 3, а показан суточный ход УФ-В-радиации в диапазоне 280–315 нм для двух выбранных дней, а на рис. 3, б – значения ОСО, измеренные в течение этих дней.

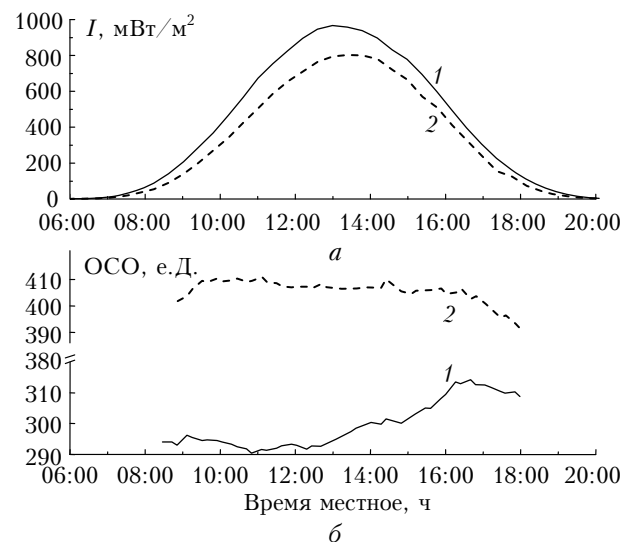


Рис. 3. Суточный ход в г. Томске интенсивности приходящей УФ-В-радиации (а) и ОСО (б) (1 – 19.04.2010, 2 – 19.04.2011)

Из сравнения данных по ОСО и УФ-В-радиации (рис. 3) видно, что из-за падения ОСО 19 апреля 2011 г. в среднем на 26% относительно 19 апреля 2010 г. наблюдался прирост суточной суммы УФ-В-радиации на 41%. При этом прирост

эритемной радиации за счет ее части, слабо реагирующей на изменение ОСО в УФ-А-области спектра, составил 36%. Мы провели сравнение до- и послеполуденных значений приходящей УФ-радиации, полученных в 12:59 и 13:47 местного времени при одинаковых зенитных углах (рис. 4) в диапазоне длин волн 290–325 нм. Здесь и далее под термином «полдень» подразумевается солнечный полдень.

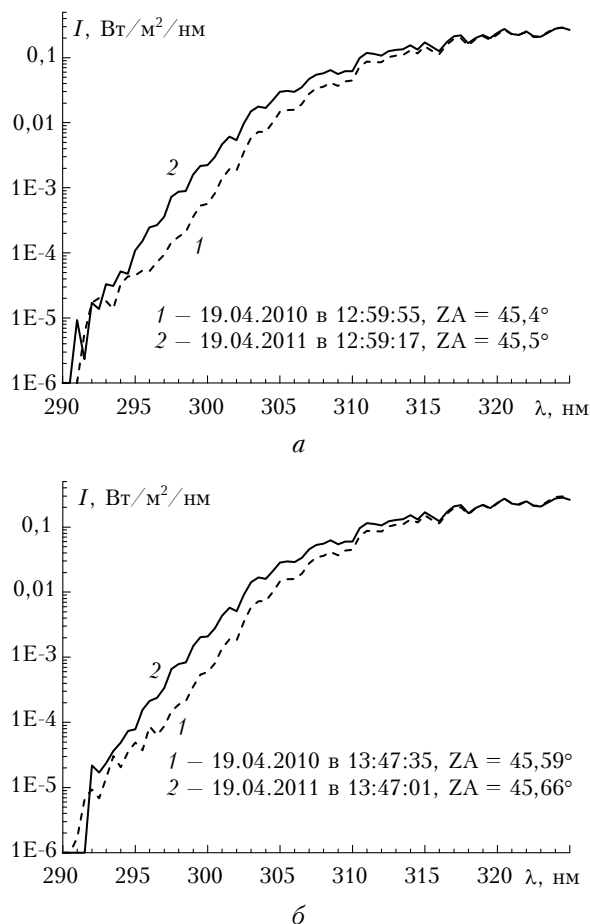


Рис. 4. Дополуденные (а) и послеполуденные (б) значения приходящей УФ-радиации, полученные при близких зенитных углах Солнца

Из рис. 4 видно, что в области УФ-В-радиации за исключением длин волн короче 293 нм в день с меньшим значением ОСО интенсивность приходящей солнечной радиации выше. Однако по мере приближения к длине волны 319 нм в обоих случаях разница в значениях интенсивности для более коротких длин волн исчезает. А для длин волн более 319 нм даже отмечается большее поступление солнечной радиации 19 апреля 2010 г. по сравнению с поступлением 19 апреля 2011 г. Отсутствие данных об уровне УФ-В-радиации в области спектра, близкой к $\lambda = 290$ нм, объясняется тем, что интенсивность солнечной радиации в г. Томске в дни измерений в этой области спектра была близка к нулевой и не превышала порога обнаружения спектрофотометра.

4. Обсуждение полученных результатов

Сравним спектральные значения интенсивности приходящей УФ-радиации, измеренной в 12:59 и 13:47 местного времени 19 апреля 2010 и 2011 гг. Результат (рис. 5) представим в виде кривой процента прироста интенсивности значений УФ-радиации, полученных в 2011 г., к значениям 2010 г. с шагом 0,5 нм в спектральной области 290–325 нм. Считаем, что при незначительной разности АОТ, приземного давления и одинаковых атмосферных массах (см. табл. 1) влиянием этих факторов в дальнейшем для данных двух рассматриваемых дней можно пренебречь.

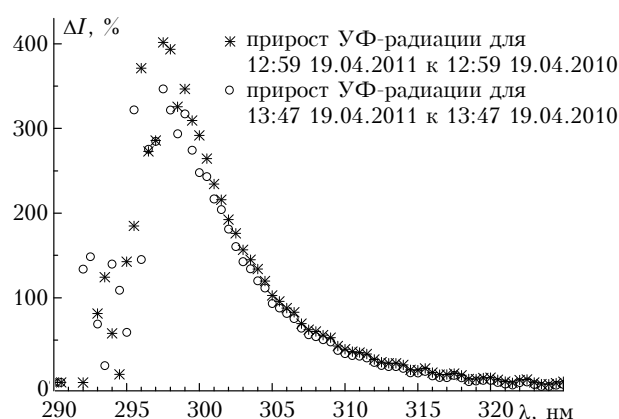


Рис. 5. Прирост (%) околополуденной интенсивности УФ-радиации 19 апреля 2011 г. к 19 апреля 2010 г.

Максимальные уровни «устойчивого» прироста УФ-радиации отмечаются в области 297 нм, где значения дополуденной интенсивности поступающей радиации и в 2011 г. превышают аналогичные в 2010 г. в пять раз. В диапазоне 290–297 нм ряд полученных значений выходит за рамки шкалы как в положительную, так и в отрицательную сторону. Это обусловлено тем, что количество фотонов, достигающих поверхности Земли, в этом диапазоне достаточно мало и сам диапазон лежит в области полосы поглощения озона Хартли (200–300 нм). Дополнительные факторы ослабления УФ-радиации вносят в картину происходящего значительные изменения, приводя к тому, что диапазон изменения УФ-радиации для данных двух случаев колеблется в пределах от –85 до +830%.

В области 300–305 нм прирост УФ-В-радиации падает с 300 до 100%, снижаясь в районе 310 нм до 40%. В области 319–325 нм среднее изменение УФ-радиации для двух рассматриваемых случаев составило в среднем +0,35% и находилось в пределах от –4,9 до +5,5% по сравнению со значениями 19 апреля 2010 г. Такое поведение УФ-радиации выглядит противостоественно. При падении значения ОСО на 26% поглощение УФ-радиации в полосе Хьюгинса (300–360 нм) должно было значительно уменьшиться, что привело бы к однозначному рос-

ту интенсивности УФ-радиации в данном диапазоне в приземном слое при прочих равных условиях. Это показано в работе [19] на примере отклика приходящей УФ-радиации на однопроцентное уменьшение значения ОСО.

Для выявления причин, из-за которых отмечается столь необычное поведение интенсивности приходящей УФ-радиации в диапазоне 319–325 нм, было проведено сравнение внутрисуточных до- и послеполуденных значений интенсивности УФ-радиации, при максимально близких значениях зенитных углов Солнца. Для этого были выбраны два дня – 19.04.2011 и 10.04.2010 г. Из измерений 19.04.2011 было выбрано две пары разовых измерений УФ-радиации, где в одном случае ОСО увеличилось на 1,6%, а в другом на 3,5%. А из измерений 10.04.2010 взята одна пара измерений, где ОСО уменьшилось на 1,6%. При сравнении измерений 10.04.2010 и 19.04.2011 общий и нижний баллы облачности были равны нулю. Кроме того, 10 апреля 2010 г. уровень ОСО в среднем был больше, чем 19 апреля 2011 г., на 62%. Существенным отличием при проведении измерений УФ-радиации можно считать также наличие снежного покрова 10.04.2010 в районе проведения измерений и отсутствие его 19.04.2011. Рассчитанные значения вариаций интенсивности УФ-радиации для длин волн в диапазоне 290–325 нм представлены на рис. 6.

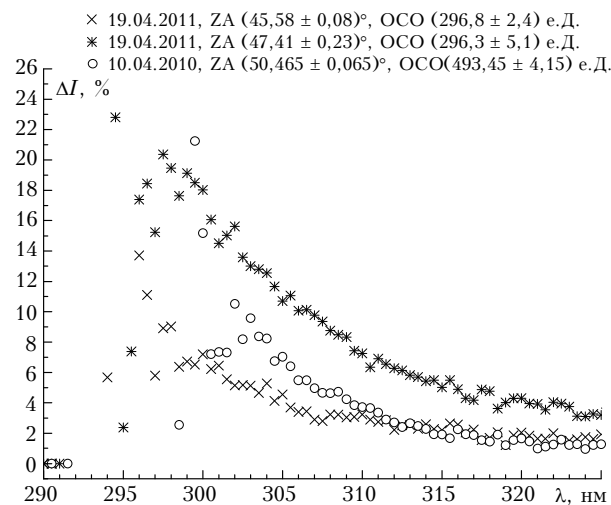


Рис. 6. Вариации дневных до- и послеполуденных значений УФ-радиации в спектральном диапазоне 290–325 нм, при близких ZA, обусловленные внутрисуточными изменениями ОСО

Видно, что, несмотря на значительную разницу в дневных значениях ОСО 10.04.2010 ZA (50,465 ± 0,065)° и 19.04.2011 ZA (45,58 ± 0,08)°, в диапазоне длин волн 310–325 нм для двух пар измерений наблюдается синхронное поведение УФ-радиации. Существенные отличия значений УФ-радиации в диапазоне длин волн 300–310 нм, по нашему мнению, могли быть вызваны различным альбедо подстилающей поверхности, вследствие чего 10.04.2010 при наличии снежного покрова на

этом участке спектра отмечается более высокий прирост интенсивности УФ-радиации, нежели 19.04.2011. В области 290–300 нм для этих двух пар измерений разброс значений изменений УФ-В-радиации становится существенным. Для пары измерений 10.04.2010 устойчивый рост разности интенсивностей, начавшийся на 325 нм, заканчивается на 302 нм, а для пары 19.04.2011 на 297,5 нм.

Что касается пары измерений 19.04.2011, где изменения ОСО составили 3,5% (47,41 ± 0,23)°, то здесь, так же как и на рис. 5, устойчивый прирост отмечается в диапазоне 325–297,5 нм с максимальными значениями на 297,5 нм. В диапазоне 290–297 нм имеются большой разброс значений, два провала в области 291 и 295 нм и максимум на длине волны 291,5, составляющий 83%.

Полученный нами результат сравнения трех пар измерений (см. рис. 6) оказался достаточно близок к данным, описанным в работе [19]. В ней представлены значения прироста УФ-радиации, вызванного падением ОСО на 1%, от 0,2 до 0,6% на длине волны 320 нм и от 0,4 до 1% на 315 нм для зенитных углов Солнца 0 и 70° соответственно. Мы получили на 320 нм близкое процентное соотношение падения ОСО и прироста УФ-радиации. Для 315 нм на 1% падения ОСО приходится 1,1–1,3% прироста УФ-радиации в диапазоне зенитных углов 45,5–50,5°. Тем не менее все вышесказанное никак не объясняет причину того, что при падении ОСО 19 апреля 2011 г. на 26% по отношению к 19 апреля 2010 г. в диапазоне длин волн 319–325 нм не отмечается существенного приращения УФ-радиации. По нашему мнению, это обусловлено влиянием облачности и альбедо подстилающей поверхности. Для определения влияния на приходящую УФ-радиацию 19 апреля 2011 г. таких факторов, как зенитный угол Солнца, ОСО и облачность, были дополнительно обработаны два массива данных, полученные спектрофотометром Brewer в г. Томске в этот день по ОСО и УФ-радиации. Всего в этот день было произведено 50 измерений ОСО по прямому Солнцу в диапазоне зенитных углов от 74,5° утром до 91,96° вечером и 54 спектральных измерения УФ-радиации в диапазоне углов от 91,54° утром до 91,96° вечером. Каждый из массивов данных по УФ-радиации и ОСО был разделен на два относительно солнечного полудня – на до- и послеполуденный. Они были отсортированы по значению зенитного угла Солнца и проинтерполированы с шагом 20 угл. мин 40 с. В итоге было получено по 135 до- и послеполуденных значений УФ-радиации в диапазоне зенитных углов Солнца от 45,34° до 91,5° и по 90 до- и послеполуденных значений ОСО в диапазоне зенитных углов Солнца от 45,34° до почти 76,0°. Проведенные преобразования данных позволили рассчитать приращение послеполуденного ОСО к дополуденному $\Delta\text{ОСО} = (\text{ОСО}_{\text{дополуд}} - \text{ОСО}_{\text{послеполуд}}) / \text{ОСО}_{\text{послеполуд}} \cdot 100\%$ и изменение

последополуденной интенсивности УФ-радиации к до-полуденной ($\Delta I = (I_{\text{последополуд}}^{\lambda} - I_{\text{дополуд}}^{\lambda}) / I_{\text{дополуд}}^{\lambda} \cdot 100\%$). Из всего объема данных по УФ-радиации был вы-бран набор ΔI , соответствующих 6 длинам волн от 300 до 325 нм с шагом 5 нм. Результаты расчетов по этим длинам волн приведены на рис. 7.

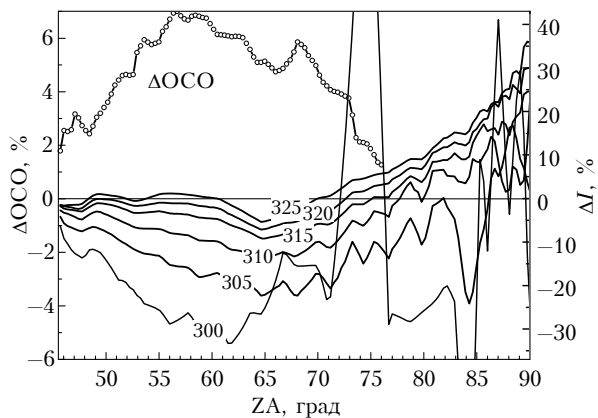


Рис. 7. Внутрисуточные вариации 19.04.2011 ΔO_{300} и ΔI УФ-радиации на длинах волн 300, 305, 310, 315, 320, 325 нм

Учет влияния облачности на приходящую об-щую УФ-радиацию проведем по данным наблюде-ний геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, чья площадка расположена в непосредствен-ной близости от здания, на котором установлен спектрофотометр Brewer. Данные по облачности во время светового дня 19 апреля 2010 г. и 19 апреля 2011 г. представлены в табл. 2.

Для 19 апреля 2011 г. было установлено при-мерно следующее соответствие местного времени и послеполуденных зенитных углов: 15:00–49,5°; 16:00–55°; 17:00–62°; 18:00–70°; 19:00–78°; 20:00–86°. Первое появление облачности в районе 15:00 на всех шести длинах волн приводит к тому (рис. 7), что уменьшение, вызванное ростом ОСО после солнечного полудня, частично компенсиру-ется, причем для λ , лежащих в диапазоне 320–325 нм, несмотря на прирост ОСО более чем на 2%, облачность полностью компенсирует потери прямой радиации. Далее с 16:00 отмечается разно-направленное поведение длин волн, лежащих в об-ласти УФ-А- и УФ-В-спектра (см. рис. 7). Для области УФ-В видим падение значений по отно-шению к утренним, а для 320 и 325 нм на времен-ном отрезке 15:00–15:30 отмечается даже прирост, несмотря на рост ОСО.

На следующем временном отрезке с 16:00 до 17:00 значения послеполуденного ОСО падают по отношению к утренним, но одновременно падают и значения УФ-радиации для всех длин волн. Это объясняется тем, что к 17:00 над местом наблюде-ний установилась ясная погода. Далее, с 17:00 до 18:00, судя по поведению УФ-радиации на длинах волн 325–305 нм, устанавливается полностью без-облачная погода (между зенитными углами 64 и 65°, что примерно соответствует 17:15–17:20 местного времени). После 17:20 отмечается переходный пери-од от безоблачной ситуации к малооблачной. Это сразу отражается на интенсивности УФ-радиаци-и, для всех шести длин волн процент падения послеполуденных значений к дополуденным умень-шается, а для 325 нм он падает до нуля, несмотря на разницу в значениях ОСО более чем 4%.

С 18:00 до 19:00 облачная ситуация не меняет-ся, но происходит сближение послеполуденных значений ОСО с дополуденными. Из рис. 7 видно, что для длин волн от 310 до 325 нм кривые ΔI_{λ} пересекают ось абсцисс и послеполуденные значе-ния УФ-радиации уже больше дополуденных. Весьма неустойчивая картина поведения ΔI наблю-дается на длине волны 300 нм, где вдруг проявля-ются резкие изменения этого отношения: с –22 до +86% (на рис. 7 до +44%). Причем они вызваны не дополуденным провалом, а именно послеполуден-ным всплеском на данной длине волны. Возможно, это связано с динамикой форм облаков и характе-ром облачности над местом измерений.

После 19:00 и до заката Солнца при больших зенитных углах измерения ОСО на спектрофото-метре Brewer не проводятся, поэтому нет возмож-ности судить о том, какие изменения происходили с ОСО. Вместе с тем известно, что при росте зенит-ного угла Солнца в диапазоне 80–90° растет эф-фективная высота ослабления излучения в области 290–325 нм и она может уже находиться над слоем озонового максимума в стратосфере [20]. Следова-тельно, с ростом зенитного угла будет регистриро-ваться уменьшение чувствительности к ОСО УФ-радиации, измеряемой у поверхности Земли в этой области спектра. Прямая радиация при этом прак-тически полностью поглощается озоном, и ее роль незначительна, поскольку доля в суммарной радиа-ции стремится к нулю (менее 0,001%) [20].

Таким образом, отношение послеполуденной УФ-радиации 19 апреля начиная с 19:00 по отно-шению к дополуденной можно объяснить исключи-тельно влиянием формы, размеров и динамикой облаков верхнего яруса в этот день.

Таблица 2

Облачная ситуация в районе проведения измерений УФ-радиации и ОСО

Дата	Облака	Время местное, ч														
		6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
		Тип/балл облачности														
19.04.10	количество	10/0	7/4	3/0	0/0	0/0	2/2	5/5	5/5	6/5	6/5	6/5	10/3	10/1	8/0	8/0
	вид	Ac, Ci	St, Ac	Ci	–	–	Cu	Cu	Cu	Cu, Ci	Cu, Ci	Cu, Ci	Cu, Ci	Cu, Ci	Ac, Cu	Ac, Cu
19.04.11	количество	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	1/0	1/0	0/0	1/0	1/0	1/0
	вид	–	–	–	–	–	–	–	–	–	Ci	Ci	–	Ci	Ci	Ci

На основании приведенных результатов совместного наблюдения УФ-радиации и ОСО 19 апреля 2011 г. можно сделать следующие выводы. При зенитных углах $49-60^\circ$ и наличии облачности значения приземной УФ-радиации в диапазоне длин волн $300-325$ нм увеличивались. Причем для $\lambda = 325$ нм с учетом ослабляющего влияния ОСО (т.е. с учетом изменений примерно на 1% интенсивности УФ-радиации при изменении ОСО на 1%, как мы определили выше) данное усиление УФ-радиации достигало 8%, примерно на столько же выросла ее интенсивность в районе зенитного угла 75° . При больших значениях зенитных углов облачность спровоцировала дополнительное увеличение интенсивности приходящей УФ-радиации по отношению к условиям ясного неба. Для зенитных углов $80-85^\circ$ увеличение УФ-радиации в области спектра $310-325$ нм составило в среднем 10%, а для зенитных углов и $85-90^\circ$ в диапазоне длин волн $300-325$ нм – 15%.

Рассмотрев поведение УФ-радиации 19 апреля 2011 г., можно сравнить ее околополуденные значения 19 апреля 2010 и 2011 гг. (см. рис. 5). Для 19 апреля 2010 г. ситуация с альбедо подстилающей поверхности и облачностью значительно отличается от ситуации 19 апреля 2011 г. *Во-первых*, снег 19 апреля 2010 г. еще не сошел. И, по оценкам разных авторов [19, 21–24], альбедо заснеженной поверхности, идентичной той, в условиях которой проводятся измерения спектрофотометром Brewer MKIV S/N 049, может колебаться в пределах 40–80% и приводить к увеличению эритемной УФ-радиации более чем на 20%. *Во-вторых*, в эти дни значительно отличается ситуация с облачностью (см. табл. 2). В околополуденное время, когда проводились измерения УФ-радиации 19 апреля 2010 г., в районе измерений были кучевые облака нижнего яруса с баллом облачности, равным 5. Согласно [25] кучевые облака могут значительно ослабить солнечное излучение в области УФ–В-радиации, однако эти же облака при свободном падении прямых солнечных лучей на Землю способны вызывать локальное увеличение приземной УФ–В-радиации до 27%.

Для оценки вклада альbedo подстилающей поверхности и облачности в измеренную УФ-радиацию 19 апреля 2010 г. было проведено сравнение приходящей УФ-радиации 19.04.2010 и 19.04.2011 в период, когда в эти дни отмечалась безоблачная ситуация. По данным геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, она отмечалась в 9:00 и 10:00 местного времени (см. табл. 2). В это время при близких значениях зенитных углов Солнца и массы атмосферы разница в значениях УФ-радиации в сравниваемые дни должна определяться ОСО и вкладом альbedo подстилающей поверхности. На рис. 8 представлены 4 случая сравнения измеренных значений УФ-радиации в условиях ясного неба.

Отчетливо видно, что в диапазоне длин волн $303-325$ нм при более высоких значениях зенитного угла процент прироста УФ-радиации выше. Такое же поведение кривых прироста УФ-радиации

описано в работе [19]. При самом низком значении зенитного угла максимум прироста сдвигается в коротковолновую область спектра.

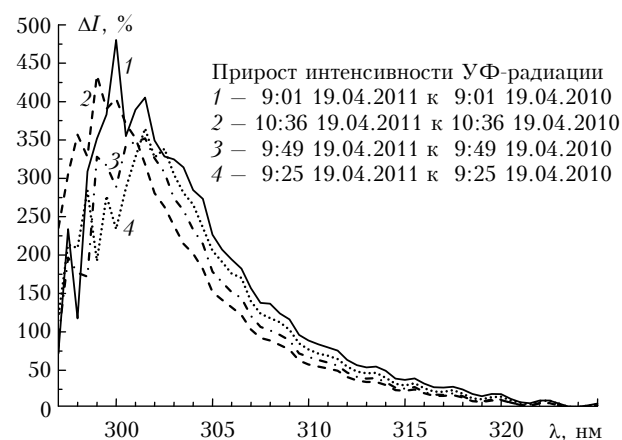


Рис. 8. Прирост УФ-радиации 19.04.2011 в условиях ясного неба при равных ЗА по отношению к 19.04.2010

Кроме того, в области 324 нм отмечаются отрицательные значения, а в диапазоне $319-325$ нм – значения прироста (с учетом того что ОСО изменился более чем на 27%) еще ниже тех, которые представлены на рис. 6. Для оценки влияния альbedo подстилающей поверхности на значения УФ-радиации 19.04.2010 воспользуемся спектральными коэффициентами вклада альbedo подстилающей поверхности в фактическое значение УФ-радиации из работы [26], в которой представлены спектральные зависимости для альbedo 90, 70 и 50% и зенитного угла 55° . Для определения возможного прироста УФ-радиации 19.04.2010 в условиях ясного неба мы выбрали значение альbedo, равное 50%. На рис. 9 приведены спектральные коэффициенты коррекции значений УФ-радиации с учетом альbedo подстилающей поверхности (кривая 4), фактический и рассчитанный с использованием данных коэффициентов прирост УФ-радиации и их процентное изменение.

Из рис. 9 видно, что прирост УФ-радиации в случае поправки на альbedo подстилающей поверхности максимально увеличивается в районе 300 нм и имеет минимальные значения в диапазоне длин волн $319-325$ нм, при этом в данной области спектра он эквивалентен проценту изменения ОСО между двумя днями измерений 2010 и 2011 гг. Результат, представленный на рис. 9 (кривая 2), схож с результатом в работе [27], который был получен с использованием данных спектрометра Brewer S/N 005, проводящего измерения ОСО и УФ-радиации с сентября 1989 г. в г. Салоники (Греция). При этом в диапазоне длин волн $295-300$ нм в Салониках фиксировали больший прирост радиации, а в диапазоне $300-325$ нм прирост был больше в г. Томске.

Чтобы оценить совместное влияние облачности и альbedo подстилающей поверхности на изменение УФ-радиации, рассмотрим дополуденные и послеполуденные измерения УФ-радиации при близких зенитных углах Солнца 19 апреля 2011 г. и 19 апреля 2010 г. Однако предварительно сравним пары

измерений, проведенных в рамках одного дня до и после солнечного полудня. На рис. 10, *a* кривая 1 отражает прирост интенсивности УФ-радиации, измеренной после полудня, по отношению к дополу-денному измерению.

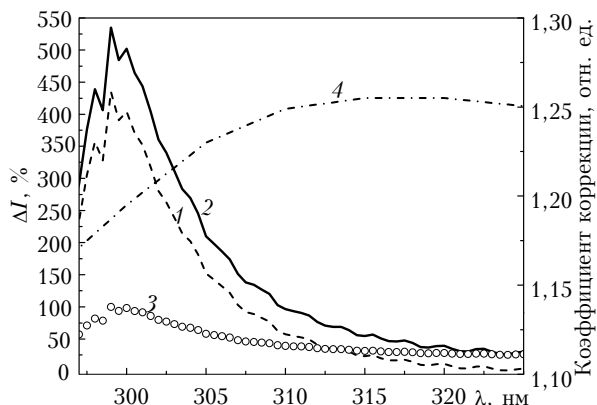


Рис. 9. Прирост интенсивности ΔI дополу-денной УФ-радиации 19.04.2011 к дополу-денной интенсивности 19.04.2010 в условиях ясного неба при $ZA \cong 55^\circ$: 1 – фактический; 2 – рассчитанный (за вычетом вклада альbedo подстилающей поверхности, принятого нами за 50%); 3 – разность фактического и расчетного прироста ΔI ; 4 – коэффициент вклада альbedo подстилающей поверхности в интенсивность приходящей УФ-радиации в условиях ясного неба при $ZA \cong 55^\circ$ и альbedo подстилающей поверхности 50%

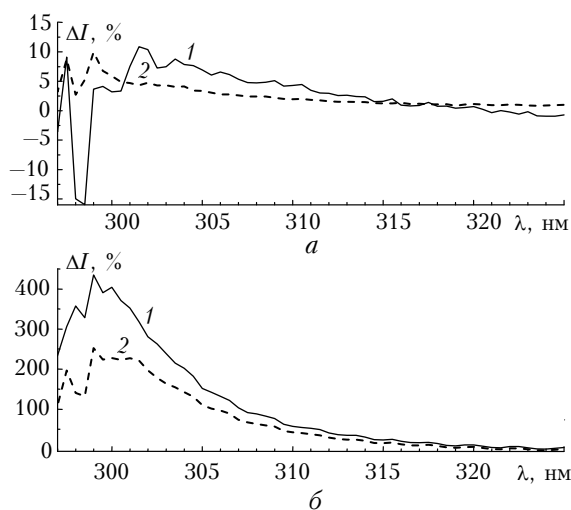


Рис. 10. Вариации интенсивности УФ-радиации при различных условиях измерений: *a* – внутрисуточные (кривая 1 – прирост интенсивности послеполу-денной УФ-радиации в условиях облачности к дополу-денной в условиях ясного неба; 2 – средний прирост УФ-радиации в условиях ясного неба в апреле в 2010 и 2011 гг. при падении ОСО на 1% для $ZA \cong 55^\circ$); *b* – межгодовые (кривая 1 – фактический прирост интенсивности УФ-радиации, измеренной до солнечного полудня в условиях ясного неба 19.04.2011, к УФ-радиации, измеренной 19.04.2010 для $ZA \cong 55^\circ$; 2 – фактический прирост интенсивности УФ-радиации, измеренной до солнечного полудня 19.04.2011 в условиях слабой облачности перистых облаков верхнего яруса, к интенсивности УФ-радиации, измеренной 19.04.2010 в условиях пятибалльной облачности кучевых облаков нижнего яруса для $ZA \cong 56^\circ$)

Измерения проводились 19.04.2010 при зенитных углах Солнца, близких к 55° . Во время после-полуденного измерения ОСО было на 1% меньше, однако, несмотря на это, в области 321–325 нм отмечается спад приходящей УФ-радиации. При этом максимальный прирост интенсивности, равный 10,4%, отмечается на длине волны 302 нм. Сравнивая полу-лученный результат со средним приростом в усло-виях ясного неба, рассчитанный по четырем парам измерений, проводимых в рамках одного измери-тельного дня в апреле 2010 и 2011 гг. (рис. 10, *a*, кривая 2), можно сделать вывод, что в данном слу-чае облачная ситуация (см. табл. 2), сложившаяся в момент проведения измерений УФ-радиации 19.04.2010, для разных участков спектра оказывала разнонаправленное воздействие, уменьшая и увели-чивая интенсивность приходящей УФ-радиации. Размер добавки в диапазоне длин волн 302–325 нм, вызванный облачностью с учетом того, что умень-шение ОСО на 1% также вносит свой вклад, колеб-лется в пределах от -2 до $+5,6\%$. Можно считать, что в данном случае ослабление интенсивности УФ-радиации, измеренной спектрофотометром Brewer в длинноволновой области спектра, вместо ожидае-мого роста вызвано несколькими ярусами облачно-сти, препятствующими проникновению радиации к поверхности Земли, а ее прирост в других частях спектра стал возможен благодаря переотражению от облаков нижнего яруса (5 баллов) и снежного покрова на подстилающей поверхности. Кривые 1 и 2, представленные на рис. 10, *b*, показывают со-отношения до- и послеполу-денных значений интен-сивности УФ-радиации 19.04.2011 к 19.04.2010. В силу увеличения количества факторов, влияющих во время послеполу-денных измерений на соотноше-ние значений интенсивности УФ-радиации, вычле-нить вклад каждого из них в уменьшение прироста по сравнению с дополу-денными измерениями прак-тически не представляется возможным. Совместное участие, с одной стороны, альbedo подстилающей поверхности (оцениваемого нами в 50%), изменения ОСО на 1%, кучевой и перистой облачности 19 апреля 2010 г., а с другой стороны, перистой обла-чности и изменения ОСО на 6% 19 апреля 2011 г. между дополу-денным и послеполу-денным измере-ниями, привело к тому, что максимальная разница в приросте интенсивности УФ-радиации пришлось на длину волны 298 нм.

Заключение

На основе данных измерений УФ-радиации в апреле в 2010–2011 гг. получена оценка вариаций спектральных характеристик УФ-радиации в зави-симости от ОСО для зенитных углов $45,5$ – $50,5^\circ$. Она показала, что изменение значений ОСО на 1% при прочих близких условиях вызывает изменение УФ-радиации в диапазоне 319–325 нм не менее чем на 1%. Полученная оценка позволила определить вклад альbedo подстилающей поверхности, покры-той снегом, в прирост УФ-радиации в области 290–325 нм. Выявлено, что для диапазона длин волн

319–325 нм наличие снежного покрова может приводить к приросту интенсивности радиации, который способен компенсировать последствия падения ОСО на 26%.

Оценка влияния перистых облаков верхнего яруса при зенитных углах Солнца 50–60° показала, что при балле, равном 1, облачность может компенсировать падение интенсивности в коротковолновой области УФ-радиации, вызванное приростом ОСО на 2–7%. Для зенитных углов 80–85° наличие облачности данного типа, при балле облачности, равном 2, приводит к увеличению интенсивности приходящей радиации в области спектра 310–325 нм в среднем на 10%, а для зенитных углов и 85–90° в диапазоне длин волн 300–325 нм – на 15%. При наличии снежного покрова на подстилающей поверхности в диапазоне длин волн 302–325 нм кучевые и перистые облака (6/5 баллов) по сравнению с условиями ясного неба могут изменять интенсивность приходящей УФ-радиации в пределах от –2 до +5,6%.

Сравнение апрельских значений УФ-радиации, измеренной в г. Томске в условиях аномального озонового минимума в 2011 г. и в фоновых условиях в 2010 г., показывает, что основной вклад в разницу значений в спектральном диапазоне измерений вносило значительное понижение общего содержания озона относительно многолетней нормы. Для отдельных участков спектра 290–325 нм влияние таких факторов, как облачность и альbedo подстилающей поверхности, в сравниваемые дни проведения измерений могло частично или полностью компенсировать последствия значительного падения ОСО.

Авторы выражают признательность сотрудникам геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН за предоставленные данные по облачности и состоянию снежного покрова.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5, междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 35, 70 и 131, грантов РФФИ № 11-05-00470, 11-05-00516, 11-05-93116 и 11-05-93118, госконтрактов Минобрнауки № 11.519.11.5009, 11.518.11.7045, 14.515.11.0030 и 8325, договора о научно-техническом сотрудничестве между ИОА СО РАН и ЦАО Росгидромета.

1. Дорохов В.М. Наблюдения общего содержания озона в Арктике на о. Хейса (81° с.ш.) зимой 1989 г. // Оптика атмосфер. и океана. 1990. Т. 3, № 1. С. 102–106.
2. Дорохов В.М., Долгий С.В., Иванов Ю.С., Ситникова В.И. Наблюдения общего содержания атмосферного озона в Арктике в период полярной ночи 1991 г. // Оптика атмосфер. и океана. 1991. Т. 4, № 8. С. 852–855.
3. Дорохов В.М., Фиолетов В.Е., Ситникова В.И. Вариации общего содержания озона и двуокиси азота в атмосфере Арктики в условиях полярной ночи 1989/90 и 1990/91 // Метеорол. и гидрол. 1992. № 6. С. 54–59.
4. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Складнева Т.К. Вариации ультрафиолетовой В-радиации в Томске в 2003–2007 гг.

- // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 7. С. 619–624.
5. Manney G.L., Santee M.L., Rex M., Livesey N.J., Pitts M.C., Veefkind P., Nash E.R., Wohltmann I., Lehmann R., Froidevaux L., Poole L.R., Schoeberl M.R., Haffner D.P., Davies J., Dorokhov V., Gernandt H., Johnson B., Kivi R., Kyro E., Larsen N., Levelt P.F., Makshtas A., McElroy C.T., Nakajima H., Parrondo M.C., Tarasick D.W., von der Gathen P., Walker K.A., Zinoviev N.S. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011 // Nature. (Gr. Brit.) 478. P. 469–475. doi: 10.1038/nature10556.
 6. Баженов О.Е., Бурлаков В.Д. Аномальное понижение уровня общего содержания озона над Томском и северной территорией России в марте–апреле 2011 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 515–519.
 7. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Складнева Т.К. Многолетний мониторинг суммарной и ультрафиолетовой (В) радиации в районе Томска // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 61–65.
 8. Dorokhov V., Tsvetkova N., Yushkov V., Nakajima H., Ivlev G., Makshtas A., Tereb N., Goutail F., Pazzino A., Pommereau J.-P. Arctic ozone loss in Siberia in 2011 and 2012 // Atmos. Measur. Technol. Discuss. 2013. V. 6. P. 2955–2978. doi: 10.5194/amtd-6-2955-2013.
 9. Dorokhov V., Yushkov V., Nakajima H., Makshtas A., Tereb N., Ivlev G., Savinykh V., Shepelev D., Goutail F., Pommereau J.-P., Pazmino A. Total ozone and ozone profile observations by SAOZ, Brewer and ozone sondes in Russia // Geophys. Res. Abstracts, EGU General Assembly 2013. 2013. V. 15. P. 1114.
 10. Ivlev G.A., Belan B.D., Dorokhov V. Ozone and UV-B monitoring in Tomsk, Central Siberia // Geophys. Res. Abstracts, EGU General Assembly. 2013. V. 15. P. 4137.
 11. Ивлев Г.А., Белан Б.Д., Дорохов В.М., Тереб Н.В. Спектральные наблюдения изменений общего содержания озона в Обнинске и Томске в 2011 и 2012 гг. // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 325–331.
 12. Складнева Т.К., Ивлев Г.А. Ослабление суммарной и ультрафиолетовой радиации дымами лесных пожаров в Томске в июле 2012 г. // XIX рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. 2012. С. 69–70.
 13. Ужegov В.Н., Козлов В.С., Панченко М.В., Польшкин В.В., Польшкин В.В., Пхалагов Ю.А., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П., Яшуева Е.П. Комплексное исследование оптических свойств естественного дымового аэрозоля в июле 2012 г. в г. Томске // XIX рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. 2012. С. 11.
 14. Ужegov В.Н., Кабанов Д.М., Пхалагов Ю.А., Сакерин С.М. Высота однородной аэрозольной атмосферы в дымах лесных пожаров в июле 2012 года // XIX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. 2012. С. 12.
 15. Козлов В.С., Яшуева Е.П., Панченко М.В. Аномальные задымления приземного воздуха в Томске в период массовых лесных пожаров в июне–августе 2012 года // XIX рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. 2012. С. 14.
 16. Чернов Д.Г., Козлов В.С., Панченко М.В., Шмаргунов В.П. Воздействие лесных пожаров на содержание аэрозоля и сажи в северо-восточных районах Сибири по результатам самолетного зондирования тропосферы // XIX рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. 2012. С. 16.

17. Аршинов М.Ю., Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Савкин Д.Е. Динамика газового и аэрозольного состава воздуха в приземном слое атмосферы в районе г. Томска в период обширных лесных пожаров летом 2012 г. // XIX рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. 2012. С. 99–100.
18. Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Самойлова С.В., Winker D.M. Лидарные исследования аэрозольных полей тропосферы во время прохождения дымов лесных пожаров в июне–июле 2012 года // XIX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. 2012. С. 102.
19. Madronich S., McKenzie R., Caldwell M.M., Bjoern L.O. Changes in ultraviolet radiation reaching the Earth's surface // *Ambio*. 1995. N 24. P. 143–152.
20. Жданова Е.Ю., Чубарова Н.Е. Оценка воздействия различных атмосферных параметров на биологически активную УФ-радиацию по данным расчетов и измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 9. С. 775–781.
21. Bais A.F., Zerefos C.S., Meleti C., Ziomas I.C., Tourpali K. Spectral measurements of solar UV-B radiation and its relations to total ozone, SO₂, and clouds // *J. Geophys. Res. D*. 1993. V. 98, N 3. P. 5199–5204. doi: 10.1029/92JD02904.
22. Feister U., Grewe R. Spectral albedo measurements in the UV and visible region over different types of surfaces // *Photochem. and Photobiol.* 1995. V. 62, N 4. P. 736–744. doi: 10.1111/j.1751-1097.1995.tb08723.x.
23. Chubarova N.Ye., Yurova A.Yu., Krotkov N.A., Herman J.R., Bhartia P.K. Comparisons between ground measurements of UV irradiance 290 to 380 nm and TOMS UV estimates over Moscow for 1979–2000 // *Opt. Eng.* 2002. V. 41, N 12. P. 3070–3081.
24. Kylling A., Dahlback A., Mayer B. The Effect of Clouds and Surface Albedo on UV Irradiances at a High Latitude Site // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27, N 9. P. 1411–1414. doi: 10.1029/1999GL011015.
25. Madronich S. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere // *Environmental Effects of UV (Ultraviolet) Radiation* / M. Tevini (ed.). Boca Raton: Lewis Publ., 1993. P. 17–69.
26. Estupiñán J.G., Raman S., Crescenti G.H., Streicher J.J., Barnard W.F. Effects of clouds and haze on UV-B radiation // *J. Geophys. Res. D*. 1996. V. 101, N 11. P. 16807–16816. doi: 10.1029/96JD01170.
27. Dahlback A. Global monitoring of atmospheric ozone and solar UV radiation // *Proc. sympos. "Solar Radiation and Human Health"* / Ed. Espen Bjertness. 2008. ISBN 9788270994854. P. 23–34.

G.A. Ivlev, B.D. Belan, V.M. Dorokhov. Dynamics of solar UV-B and UV-A radiations in Tomsk during ozone anomaly in spring, 2011.

The paper presents the data of observations of solar UV-B and total radiation in Tomsk (56.5°N, 85.1°E) in 2003–2012. The total solar radiation was measured by Yanishevsky pyranometer M-115M. The UV-B radiation, using the UVB-1 pyranometer. The Brewer MKIV S/N 049 spectrophotometer was used for total ozone and spectral UV radiation observations. The measurements of solar UV-B radiation and total ozone during the emergence and development of the ozone negative anomaly in spring of 2011 are discussed. The results of the spectral measurements of UV-B, UV-A radiation and total ozone data obtained during the spring ozone anomaly in 2011 are compared with observations in the same period of 2010. The 2010 ozone and UV radiation data have been taken as the most similar to long-term averaged norm for comparison. In 2011, during the reported period, exceeded values of daily doses of UV-B radiation reached 40%, and 36% of erythemal radiation. It is shown that the main contribution to the change in the values of UV-B radiation was made by significant reduction in total ozone relative to long-term norms. It is also shown that for certain regions of the spectrum (290–325 nm), the influence of such factors as cloud cover and surface albedo could partially or fully compensate for the increase in UV radiation, caused a significant drop in total ozone.