

Изменчивость рассеянной УФ-радиации в г. Томске по измерениям 1994–2007 гг.

С.Ю. Золотов, И.И. Ипполитов, З.С. Теодорович*

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

Поступила в редакцию 17.02.2009 г.

По результатам экспериментальных наблюдений в г. Томске рассматривается многолетняя изменчивость потоков УФ-радиации в период с 1994 по 2007 г. Установлено, что основной вклад в изменения рассеянной ультрафиолетовой радиации вносят такие факторы, как состояние облачности и альbedo подстилающей поверхности. Изменчивость общего содержания озона и аэрозольной оптической толщи проявляется в рядах УФ-радиации, как правило, в виде тенденций, но не значимых трендов.

Ключевые слова: УФ-радиация, общее содержание озона, альbedo подстилающей поверхности, количество облачности; UV radiation, total ozone content, Earth surface albedo, cloudiness quantity.

Введение

Приток солнечной ультрафиолетовой радиации (УФР), доходящей до поверхности Земли, определяет все жизненно важные процессы на Земле. Так как энергия кванта УФР большая, то она обладает высокой фотобиологической и фотохимической активностью. Недостаток и избыток УФР оказывают отрицательное действие на биосферу Земли, поэтому информация об УФР представляет научный и практический интерес.

Коротковолновая граница солнечного спектра на Земле обусловлена поглощением кислорода и озона в верхних слоях атмосферы, поэтому на Земле практически не наблюдается радиация с длинами волн короче 290 нм. Проходя через атмосферу Земли, часть солнечной радиации поглощается и рассеивается атмосферой. В итоге к поверхности Земли приходят прямая и рассеянная радиация.

Для широт Москвы и Томска приход УФР на земную поверхность определяется рассеянной радиацией [1–3]. По данным работ [1, 2], летом, при средних условиях облачности, доля рассеянной радиации в суточном приходе суммарной УФР составляет 80%, а зимой возрастает до 98% и только в ясные летние дни снижается в среднем до 66–75%, а в зависимости от условий облачности дневной приход УФР может изменяться в 8–20 раз. Доля рассеянной радиации всегда падает с увеличением высоты Солнца [4]. Измерения суммарной и рассеянной УФР представлены в ряде работ [5–8].

Так, в работе [5] изучалось влияние перистых облаков на спектральное распределение прямой, рас-

сеянной и суммарной радиации в диапазоне длин волн 310–560 нм. Отмечено, что ослабление радиации перистыми облаками несколько снижается с увеличением длины волны. Зафиксированы случаи, когда суммарная радиация при перистых облаках увеличивается по сравнению с УФР при безоблачном небе.

В работе [6] показано, что основными факторами, определяющими изменение величины пропускания суммарной радиации в УФ-области спектра, являются только оптические свойства самого облака. Также отмечается рост рассеянной радиации для перистых облаков по сравнению с радиацией при ясном небе. В работе [7] отмечается, что перистые облака (8–10 баллов) увеличивают рассеянную радиацию на 5%.

В работе [8] отмечено, что в УФ-области спектра рассеянная радиация часто превышает прямую радиацию на горизонтальную поверхность. Показано, что при кучевой облачности 4–6 баллов в УФ-области с длиной волны короче 380 нм рассеянная радиация в среднем на 3–4% превосходит соответствующие значения при ясном небе. Максимальное увеличение рассеянной УФР не превышает 30–36%. При 10 баллах мощных кучевых и кучево-дождевых облаков рассеянная УФР составляет около 25% ее значения при безоблачном небе. При кучевой облачности (до 7 баллов), когда диск Солнца не закрыт облаками, значения суммарной УФ-радиации могут увеличиваться на 26–33%.

Существуют региональные особенности прихода УФР к поверхности Земли. Измерения прихода прямой, рассеянной и общей УФР проводятся на многих станциях нашей планеты. Так, в работе [9] проводится анализ наблюдений УФР в Финляндии и Греции. Показано, что изменение общего содержания озона (СО) может влиять на величину среднего месячного потока УФР для длины волны 305 нм на 100%, но в среднем составляет 35%. Максимальный

* Сергей Юрьевич Золотов (zolotov@asu.tusur.ru); Иван Иванович Ипполитов (ceo@imces.ru); Зоя Степановна Теодорович (ceo@imces.ru).

вклад облаков на приход УФР 40%, в среднем 12%. Обусловленная озоном изменчивость УФР значительно сильнее в Финляндии, чем в Греции. Отмечается, что по измерениям в Греции отсутствует заметный долговременный тренд УФР, обусловленный изменениями ОСО.

По измерениям прихода УФР в трех городах Испании [10] сделан вывод, что в среднем облака нижнего яруса ослабляют приход УФР на 20% сильнее, чем соответствующее количество облаков верхнего яруса. Проведен анализ измерений УФР в Антарктиде за период с 1989 по 2004 г. [11]. Отмечено, что тренды УФР в феврале и марте велики (12–30% за 10 лет). Авторы считают, что они связаны с трендами облачности и приземного альбеда.

Мониторинг УФР в интервале 290–325 нм [12] проводится в двух городах Италии с 1992 г. В этой статье рассмотрены влияния фёнов и местных метеословий на УФР. В статье [13] проведен анализ измерений УФР на 8 европейских станциях за 5–10 лет и отмечено, что облака уменьшают летние величины УФР в среднем на 17–35% в различных районах Европы.

Измерения УФР в районе Тибетского нагорья [14] показали, что над снегом, при зенитном угле Солнца 50°, УФР на 35% выше, чем на соответствующих бесснежных поверхностях, а также наблюдался рост УФР при частичной облачности по сравнению с УФР при ясных днях.

По измерениям УФР на Аляске с 1991 по 2005 г. авторы работы [15] делают вывод, что в весенние периоды с аномально низкими уровнями озона суточные дозы УФР на длине волны 305 нм превышают норму в 2,6 раза.

В [16] приведены результаты измерений рассеянной УФР в Валенсии (Испания) с использованием их модельной коррекции, а в [17] говорится, что рассеяние аэрозолями приводит к перераспределению доли прямой и рассеянной радиации, незначительно изменяя суммарный поток.

Описание прибора

С 1994 г. проводятся регулярные измерения потоков УФ-излучения с помощью фильтрового УФ-спектрофотометра [3] на геофизическом стационаре Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск) по Мировым геофизическим дням. В течение каждого дня измерения выполнялись при углах склонения Солнца, кратных 5 градусам (5, 10, 15 и т.д.) при восходе и при закате, а также при максимальной высоте стояния Солнца.

Максимум эффективной спектральной чувствительности прибора для области А соответствует длине волны в 353 нм с полушириной 63 нм, а для области В — 281 нм с полушириной 24 нм.

Конструкция УФ-спектрофотометра такова, что позволяет принимать прямое солнечное излучение, начиная с угла склонения Солнца 35° и выше. Если угол склонения Солнца ниже 35°, то регистрируется только рассеянная УФ-радиация.

Область и коэффициент пропускания светофильтров регулярно контролируются на приборе «SPECORD M-40». Показатели светофильтров со временем не изменились. Контроль изменения чувствительности УФ-спектрофотометра проводится в мае–июне в ясные безветренные дни, для одинаковой высоты стояния Солнца, по возможности с близкими значениями общего содержания озона.

С августа 2004 г. проводятся одновременные измерения УФ-излучения УФ-спектрофотометром и УФМ-427 на основе озонометра М-124 (область пропускания 280–315 нм). Проведено сравнение УФ-излучения, измеренного двумя приборами, в ясные дни в зависимости от высоты стояния Солнца с шагом 2,5° (рис. 1).

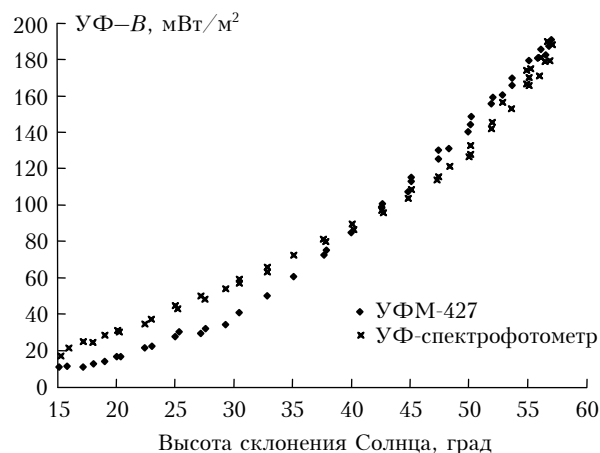


Рис. 1. Тестирование УФ-спектрофотометра относительно УФМ-427

Если мы проведем нормировку показаний УФ-спектрофотометра (выраженных в единицах напряжения электрического тока) в области УФ–В по показаниям УФМ-427 для максимальной высоты стояния Солнца для г. Томска (56,97°), то для диапазона высот 40–42° показания совпадают, для высоты 50° показания УФ-спектрофотометра меньше, чем показания УФМ-427, на 11%, а для высоты 27° показания УФ-спектрофотометра больше показаний УФМ-427 на 58%, для высоты 15° показания фотометра больше на 72%.

Эти отличия можно объяснить разницей в областях пропускания различных приборов, различными углами сбора УФ-излучения [3, 18]. Дисперсия результатов измерения УФ-излучения УФ-спектрофотометром в единицах напряжения (нетестированные отсчеты) не превышает 0,5% [19].

Для сравнения данных по измерениям потоков рассеянного УФ-излучения по годам для одной высоты стояния Солнца можно использовать нетестированные показания прибора.

Результаты измерений

В статье [20] описаны результаты измерений потоков приземной УФ-радиации на геофизическом стационаре Института мониторинга климатических

и экологических систем СО РАН за период с 1994 по 2001 г. В настоящей статье приводятся результаты анализа измерений, выполненных за период 1994–2007 гг. Всего за рассматриваемый период с сентября 1994 по август 2007 г. было проведено 5586 измерений.

Результаты всех измерений в областях УФ–А и УФ–В-излучений были сгруппированы для каждого угла склонения Солнца (5, 10, 15, 20° и т.д. до 55°), и весь дальнейший анализ проводился в рамках каждой группы независимо от другой. Большинство выводов, сделанных по результатам измерений, оказались одинаковыми (или близкими) для различных групп. В связи с этим фактом в статье непосредственно приводятся данные измерения УФ–В-радиации на высотах склонения Солнца 15 и 20°, с указанием конкретных особенностей (при их наличии) для анализа рядов других групп.

На рис. 2 показаны результаты измерения УФ–В-радиации за данный период для угла склонения Солнца 15°. Математическое ожидание данного ряда равно 0,0429 мВт/(м²·нм), стандартное отклонение – 0,0116 мВт/(м²·нм). По этим данным можно написать уравнение линейного тренда (на рис. 2 показан сплошной линией): $y(x) = 0,0813 - 1,9175 \cdot 10^{-5}x$, где x – время, годы; y – значения УФ-излучения, мВт/(м²·нм).

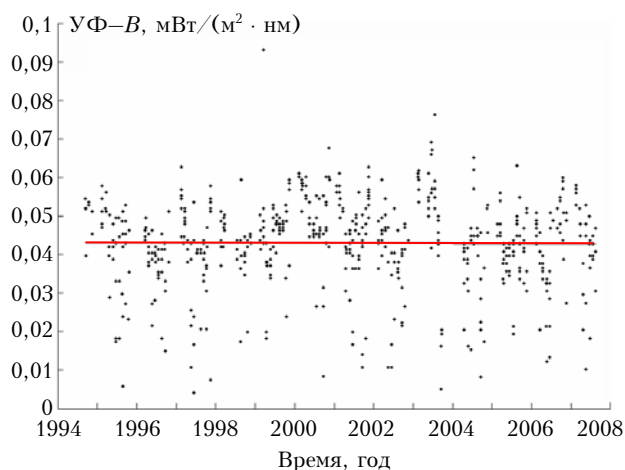


Рис. 2. Значения измерений рассеянной УФ–В-радиации за период 1994–2007 гг. для угла склонения Солнца 15°. Сплошной линией показан тренд этого ряда

Анализируя приведенные статистические характеристики ряда, можно сделать вывод относительно отсутствия тенденций по изменению показаний УФ–В-радиации за рассматриваемый период.

Наличие достаточно большого количества измерений дает возможность провести анализ зависимости входящих УФ–А- и УФ–В-излучений относительно основных факторов, влияющих на прохождение излучения в атмосфере: общего содержания озона, аэрозольной оптической толщи (АОТ), облачности.

Данные по ОСО были взяты из [21], а по АОТ (выбрана наиболее близкая длина волны 340 нм) из [22]. Состояние облачности фиксировалось на-

блюдателем непосредственно в момент проведения очередного эксперимента с классификацией типов облаков и определением их высотного яруса.

Рис. 3 показывает связь УФ–В-радиации и ОСО для безоблачного неба (при значениях АОТ, находящихся в диапазоне 0,1–0,2).

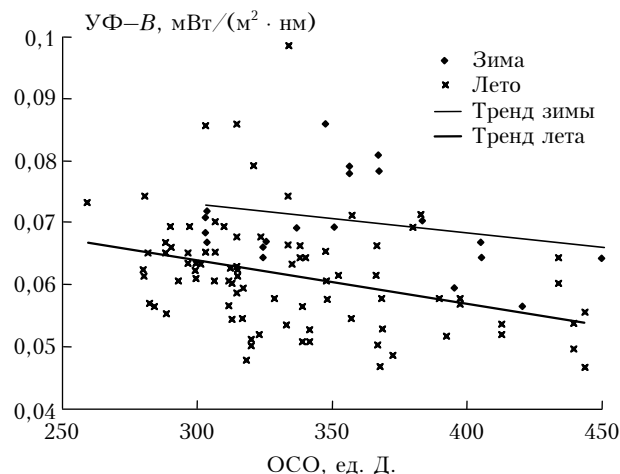


Рис. 3. Значения рассеянной УФ–В-радиации относительно ОСО для высоты склонения Солнца 20° для безоблачного неба

Для рис. 3 были выбраны значения УФ–В-радиации при угле склонения Солнца 20° и показаны отдельно значения УФ–В-радиации для зимней (22 измерения) и летней (87 измерений) выборки, включая тренды УФ–В-радиации относительно изменения ОСО для выбранных сезонных периодов. Из рис. 3 отчетливо видно, что значения УФ–В-радиации для зимы превышают летние значения. При проверке статистическая гипотеза о равенстве средних значений УФ–В-радиации в зимний и летний период опровергается даже при уровне значимости 0,001. Этот факт объясняется тем, что альbedo подстилающей поверхности в зимний период гораздо выше, чем в летний [14]. Это дополнительное отражение УФ-радиации от поверхности снега увеличивает регистрируемый прибором сигнал.

Анализ результатов выборок, приведенных на рис. 3, показывает, что влияние альbedo добавляет к зимним значениям 14,5% от средних летних значений УФ–В. Приблизительно такое же увеличение значений УФ–В зимой наблюдается и для других углов склонения Солнца (5, 10 и 15°) и для диапазона УФ–А. Для Томского региона данный результат влияния альbedo (9–15%) был также получен и в [19]. Такое относительно малое влияние альbedo в зимний период можно объяснить наличием массивов хвойных и смешанных лесов вокруг пункта наблюдения.

Из рис. 3 следует, что присутствует небольшая отрицательная зависимость УФ–В относительно увеличения ОСО. Коэффициенты корреляции между УФ–В и ОСО составляют для зимних значений минус 0,24, а для летних – минус 0,35 (оба незначимые при уровне значимости 0,90). Значимый отрицательный коэффициент корреляции для УФ–В наблюдается

только при углах склонения Солнца больше 35° (когда прибор регистрирует не только рассеянную, но и прямую УФ-радиацию) – его величина равна минус 0,22 при уровне значимости 0,90. Для области УФ–А значимых коэффициентов корреляции не зафиксировано. Данный факт подтверждается и в статье [23].

Проводя анализ изменения УФ-радиации, связанного с АОТ, можно сделать такой же вывод, как и при анализе изменений УФ-радиации относительно ОСО: наблюдается незначимая слабая отрицательная зависимость. Этот вывод согласуется с результатами других исследователей [24, 25], которые говорят об обусловленных аэрозолем потерях суммарной УФ-радиации в диапазоне 0–30%.

Однако для АОТ, при определенных условиях, нами были получены значимые коэффициенты корреляции:

1) в области УФ–А значимый коэффициент корреляции, равный минус 0,43, наблюдается при сплошном покрытии облаков верхнего яруса для угла склонения Солнца 15° ;

2) в области УФ–В значимый коэффициент корреляции, равный минус 0,48, регистрируется для углов склонения Солнца $10\text{--}15^\circ$ в основном для безоблачного неба.

Состояние облачности оказывает сильное воздействие на приходящую к поверхности Земли УФ-радиацию. Облака во всех случаях ослабляют суммарную радиацию, причем степень ослабления варьируется от 5 до 90% (в зависимости от типа и толщины облачного покрова). Рассеянная радиация в наибольшей степени ослабляется облаками нижнего яруса. Облака среднего и верхнего яруса меньше влияют на рассеянную радиацию и в отдельных случаях могут усиливать ее.

Для углов склонения Солнца до 30° приземная УФ-радиация (как в области УФ–А, так и в области УФ–В-излучения) очень чувствительна к сплошному покрову облаков нижнего яруса, что приводит к большой потере, из-за большой оптической толщи атмосферы, и так ослабленной радиации (рис. 4).

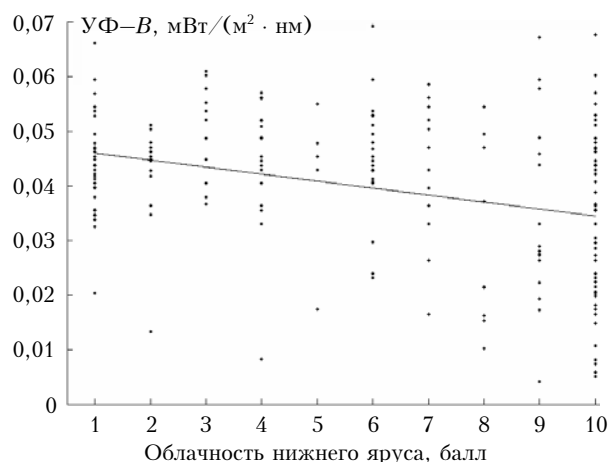


Рис. 4. Значения рассеянной УФ–В-радиации относительно баллов облачности нижнего яруса для высоты склонения Солнца 15° . Сплошной линией показан тренд данной зависимости

Данное наличие сплошного покрова вносит гораздо более весомый вклад в ослабление УФ-радиации, чем изменения значений ОСО или значений аэрозольной оптической толщи, что практически приводит к отсутствию реакции УФ-радиации на эти факторы. Этот вывод подтверждается и в работах [13, 26–28]. Большой разброс измеренных значений УФ–В-радиации при 10 баллах облаков нижнего яруса (см. рис. 4) объясняется отсутствием информации об облаках среднего и верхнего ярусов.

Большая облачность нижнего яруса зимой мало влияет на облученность Земли ультрафиолетом, а летом на 30–35% снижает облученность при таком же низком Солнце ($5\text{--}25^\circ$). При высоком Солнце ($30\text{--}50^\circ$) влияние облаков нижнего яруса значительно слабее. Облака среднего яруса слабо влияют на УФ-радиацию и летом и зимой, а облака верхнего яруса при невысоком Солнце повышают рассеянную УФ-радиацию на 5%. При угле склонения Солнца в $30\text{--}50^\circ$ сплошной покров облаков верхнего яруса повышает рассеянную компоненту УФ-излучения до 30% в области УФ–А и на 7–10% в области УФ–В-радиации.

Потери радиации за счет облачности зимой меньше, чем летом, что объясняется меньшей вертикальной мощностью зимних облаков по сравнению с летними, а также увеличением радиации в подоблачном слое за счет отражения от снега и нижней границы облаков.

Заключение

Изложенные выше результаты свидетельствуют о том, что основной вклад в изменения рассеянной ультрафиолетовой радиации вносит состояние облачности. Следующим по значимости фактором является альbedo подстилающей поверхности. Изменчивость общего содержания озона и аэрозольной оптической толщи проявляется в рядах УФ-радиации, как правило, в виде тенденций, но не значимых трендов.

Работа была выполнена в рамках проекта фундаментальных исследований СО РАН на 2007–2009 гг. № 7.10.1.1 «Исследование климатообразующих атмосферных процессов с учетом воздействия глобальных и региональных факторов» при поддержке гранта АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» № 2.1.1/544.

1. *Гараджа М.П.* Особенности прихода ультрафиолетовой радиации при различных условиях облачности // Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности. Л.: Гидрометеониздат, 1974. С. 261–264.
2. *Гараджа М.П., Незваль Е.И.* Приход и изменчивость рассеянной ультрафиолетовой радиации // Труды МосГНС. 1988. Вып. 1. С. 125–130.
3. *Елисеев А.А., Ишполитов И.И., Кабанов М.В., Колесник А.Г., Раводина О.В., Редькина Н.В., Теодорович З.С.* Исследования ультрафиолетовой радиации Солнца на поверхности Земли // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 5. С. 572–576.
4. *Лазарев Д.Н., Дементьева Т.Н.* Интегральные изменения естественной ультрафиолетовой радиации // Радиационные процессы в атмосфере и на земной поверхности. Л.: Гидрометеониздат, 1974. С. 250–254.

5. Незваль Е.И., Чубарова Н.Е. Радиационные свойства облаков верхнего яруса по данным спектральных измерений в интервале 310–560 нм // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1991. Т. 27. № 9. С. 1015–1020.
6. Чубарова Н.Е. Влияние перистых облаков на ослабление суммарной ультрафиолетовой радиации по результатам моделирования // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1991. Т. 27. № 9. С. 1022–1027.
7. Абакумова Г.М., Евневич Т.В., Незваль Е.И., Шиловцева О.А., Ярмо Е.В. Влияние облаков верхнего яруса на рассеянную и суммарную радиацию в различных участках спектра // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1991. Т. 27. № 9. С. 914–923.
8. Абакумова Г.М., Незваль Е.И., Шиловцева О.А. Влияние кучевой облачности на рассеянную и суммарную ультрафиолетовую, фотосинтетически активную и интегральную солнечную радиацию // Метеорол. и гидрол. 2002. № 7. С. 29–40.
9. Arola A., Lakkala K., Bais A., Kaurola J., Meleti C., Taalas P. Factors affecting short- and long-term changes of spectral UV irradiance at two European stations // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 17. P. 9/1–9/11.
10. Alados-Arboledas L., Alados I., Foyo-Moreno I., Olmo F.J., Alcántara A. The influence of clouds on surface UV erythemal irradiance // Atmos. Res. 2003. V. 66. N 4. P. 273–290.
11. Bernahard G., Booth C.R., Ehramjian J.C., Nichol S.E. UV climatology at McMurdo Station, Antarctica, based on version 2 data of the National Science Foundation's Ultraviolet Radiation Monitoring Network // J. Geophys. Res. D. 2006. V. 111. N 11. P. D11201/1–D11201/15.
12. Siani A.M., Ialongo I., Casale G.R., Giannini R., Cacciani M. Surface UV radiation monitoring at two Italian Brewer station (Rome and Ispra): a first comparison with OMI data // Proc. SPIE. 2006. V. 6362. P. 63622G/1–63622G/8.
13. Den Outer Peter, Staper Harry, Bais Alkiviadis, Feister Uwe, Janouch Micheal, Josefsson Weine, Kaurola Jussi, Koskela Tapani. UV climatology from quality controlled ground-based spectral UV-measurements // Proc. SPIE. 2006. V. 6362. P. 636214/1–636214/10.
14. Dahlback A., Gelsor N., Stamnes J., Gjessing Y. UV measurements in the 3000–5000 m altitude region in Tibet // J. Geophys. Res. D. 2007. V. 112. N 9. P. D09308/1–D09308/10.
15. Bernahard G., Booth C.R., Ehramjian J.C., Stone R., Dutton E.G. Ultraviolet and visible radiation at Barrow, Alaska: climatology and influencing factors on the basis of version 2 National Science Foundation network data // J. Geophys. Res. D. 2007. V. 112. N 9. P. D09101/1 – D09101/19.
16. Utrillas M.P., Marin M.J., Esteve A.R., Tena F., Canada J., Estelles V., Martínez-Lozano J.A. Diffuse UV erythemal radiation experimental values // J. Geophys. Res. D. 2007. V. 112. N 24. P. D24207/1–D24207/9.
17. Михалев А.В., Тащилин М.А., Черниговская М.А., Шапин А.Ю. Эритемная ультрафиолетовая радиация по данным наземных и спутниковых измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 63–67.
18. Гущин Г.П., Соколенко С.А. Руководство по измерению ультрафиолетовой радиации. СПб.: Изд-во Главной геофиз. обсерватории им. А.И. Воейкова, 2003. 27 с.
19. Елисеев А.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Поддубный В.В., Раводина О.В., Теодорович З.С., Щипунов А.А. Экспериментальное исследование изменчивости потоков ультрафиолетового излучения у поверхности Земли // Изв. вузов. Физ. 1998. № 9. С. 71–74.
20. Винарский М.В., Ипполитов И.И., Кабанов М.В. Долговременная изменчивость потоков УФ-радиации в г. Томске по результатам наблюдений // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 403–404.
21. Internet: <http://avdc.gsfc.nasa.gov> – Goddard space flight center, aura validation data center.
22. Internet: http://aeronet.gsfc.nasa.gov/data_menu.html – Goddard space flight center, aerosol robotic network.
23. Гогохия В.В., Еланский Н.Ф., Савиных В.В. Численная модель переноса излучения для калибровки сетевых спектрофотометров и интерпретации данных УФ-измерений // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 9. С. 1012–1021.
24. Улюмджиева Н.Н., Чубарова Н.Е. Мониторинг аэрозольных свойств атмосферы по данным измерений солнечным фотометром CIMEL по программе AERONET // Летопись погоды, климата и экологии Москвы. 2001 год. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. С. 26–29.
25. Улюмджиева Н.Н., Чубарова Н.Е., Смирнов А.В. Аэрозольные характеристики атмосферы в Москве по данным солнечного фотометра CIMEL // Метеорол. и гидрол. 2005. № 1. С. 48–57.
26. 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.
27. Чубарова Н.Е. Пропускание суммарной УФ-радиации облаками разных типов // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1993. Т. 29. № 5. С. 639–645.
28. Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Изакова О.М., Незваль Е.И., Чубарова Н.Е., Шиловцева О.А. О зависимости пропускания суммарной радиации в различных областях спектра от балла общей облачности // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1998. Т. 34. № 1. С. 141–144.

S.Yu. Zolotov, I.I. Ippolitov, Z.S. Teodorovich. Variability of the diffuse UV radiation in Tomsk from the results of observations in 1994–2007.

Based on experimental measurements in Tomsk, the UV radiation fluxes (from 1994 to 2007) is considered. We have found that cloudiness and Earth surface albedo are basing influence factors for the diffuse UV radiation fluxes. The influence total ozone content and aerosol optical depth at the UV-series are not significant.