

Весенняя особенность сезонного хода приземной ультрафиолетовой радиации в некоторых регионах России

М.А. Тащилин, А.В. Михалев*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291*

Поступила в редакцию 4.02.2009 г.

На основе спутниковых данных приземной ультрафиолетовой радиации (УФР), полученных с помощью прибора TOMS, установленного на борту спутника Earth Probe, а также данных аэрозольной оптической толщи и влагосодержания атмосферы, полученных с помощью наземной актинометрической сети станций «Аэронет», проводится анализ весенней особенности в вариациях приземной УФР на некоторой территории России (вблизи Екатеринбурга, Томска, Красноярска, Иркутска и Якутска), заключающейся в отклонении значений УФР от выраженного сезонного хода, обусловленного угловой высотой Солнца. Анализируются данные за период 1997–2003 гг. Обсуждаются возможные механизмы наблюдаемой особенности в вариациях УФР.

Ключевые слова: приземная ультрафиолетовая радиация, аэрозоли, озон, весенняя особенность; surface UV radiation, aerosols, ozon, spring feature.

Введение

Поток солнечной ультрафиолетовой радиации (УФР), проходя сквозь атмосферу Земли, претерпевает ряд изменений, в результате которых он может ослабляться, поглощаться или рассеиваться. Основными факторами, влияющими на изменение потока УФР, являются угловая высота Солнца, общее содержание озона (ОСО) в атмосфере, атмосферный аэрозоль, альbedo подстилающей поверхности, облачный покров, рэлеевское рассеяние на молекулах воздуха, атмосферное давление и т.д. Все эти факторы, изменчивые в широком временном масштабе и по-разному влияющие на УФР в различных участках спектра, в разной степени модулируют приземную УФР, в результате чего в вариациях полей УФР могут возникать пространственно-временные неоднородности и особенности.

Так, в ряде работ [1–3] была выявлена и обсуждалась весенняя особенность в вариациях приземной УФР, которая заключается в отклонении от естественного сезонного хода, определяемого угловой высотой Солнца, в регионах Западной и Восточной Сибири. На рисунках работы [4], связанной с исследованием УФР в Тибете, также можно выделить подобную особенность. Рассмотренный в [1, 2] многолетний интервал наблюдений эритемной УФР, равный 22 годам, полученный по спутниковым данным TOMS, а также наличие данной особенности в результатах работы [3], в которой использовались наземные данные прямой УФР, позволяют предположить, что данная особенность является регулярной для ряда регионов.

В настоящей статье, на основе данных спутниковых измерений приземной УФР для трех длин волн, а также наземных наблюдений прозрачности атмосферы приводится дальнейший анализ отмеченной особенности.

Использованные материалы

Спутниковые данные приземной УФР «TOMS» («Total Ozone Mapping Spectrometer» – спектрометр глобального отображения озона, интернет-ресурс ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/eptoms/data/uv_ery_4_wavelengths/) представляют собой ASCII-файлы суточных (дневных) глобальных распределений экспозиции приземной УФР поверхности Земли с угловым разрешением $1 \times 1^\circ$ по широте и долготе соответственно. Они восстанавливаются путем совместного анализа данных измерений ОСО прибором TOMS, информации о состоянии облачности атмосферы, альbedo подстилающей поверхности, а также о внеатмосферном солнечном потоке УФР [5]. Полученные таким образом данные показывают суммарную (прямую и рассеянную) интенсивность приземной УФР. Погрешность определения приземной УФР составляет $\pm 12\%$.

Для анализа были использованы данные приземной УФР за период с 1997–2003 гг. для следующих длин волн: 310, 325 и 380 нм. Для извлечения и предварительной обработки данных был использован специализированный комплекс программ [6]. С помощью этого комплекса также было проведено разделение массива данных УФР для длины волны 380 нм на ясные и облачные дни. Такое разделение позволило выделить дни, когда определяющим для УФР являлось распределение атмосферного аэрозоля (ясные дни), и дни, когда определяющим в распределении УФР мог являться облачный режим

* Михаил Анатольевич Тащилин (miketash@iszf.irk.ru); Александр Васильевич Михалев.

атмосферы (облачные дни). С целью выделения ясных и облачных дней для каждого дня года определялось максимальное и минимальное многолетнее значение УФР. Полученные таким образом распределения являются комбинированными многолетними распределениями УФР.

Также в данной статье были использованы результаты, полученные для наземной сети станций «Аэронет» (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Актинометрическая сеть «Аэронет» представляет собой автоматизированную сеть аэрозольных наблюдений, насчитывающую более 120 станций, расположенных по всему земному шару. Основой сети «Аэронет» является солнечный мультиспектральный фотометр SE-318, работающий в 8 спектральных каналах и измеряющий как прямое, так и рассеянное излу-

чение Солнца. Основными параметрами, которые определяет солнечный фотометр, являются аэрозольная оптическая толщина (АОТ), измеряемая в 7 спектральных каналах (в том числе на длине волны 380 нм), а также влагосодержание атмосферы (940 нм). Погрешность определения АОТ атмосферы составляет $\pm 0,01 \div 0,02$.

За последнее время на территории России установлено несколько таких измерительных станций. В настоящей статье использованы данные для Екатеринбурга, Томска, Красноярска, Иркутска и Якутска.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены среднегодовые вариации приземной УФР на длине волны 310, 325 и 380 нм,

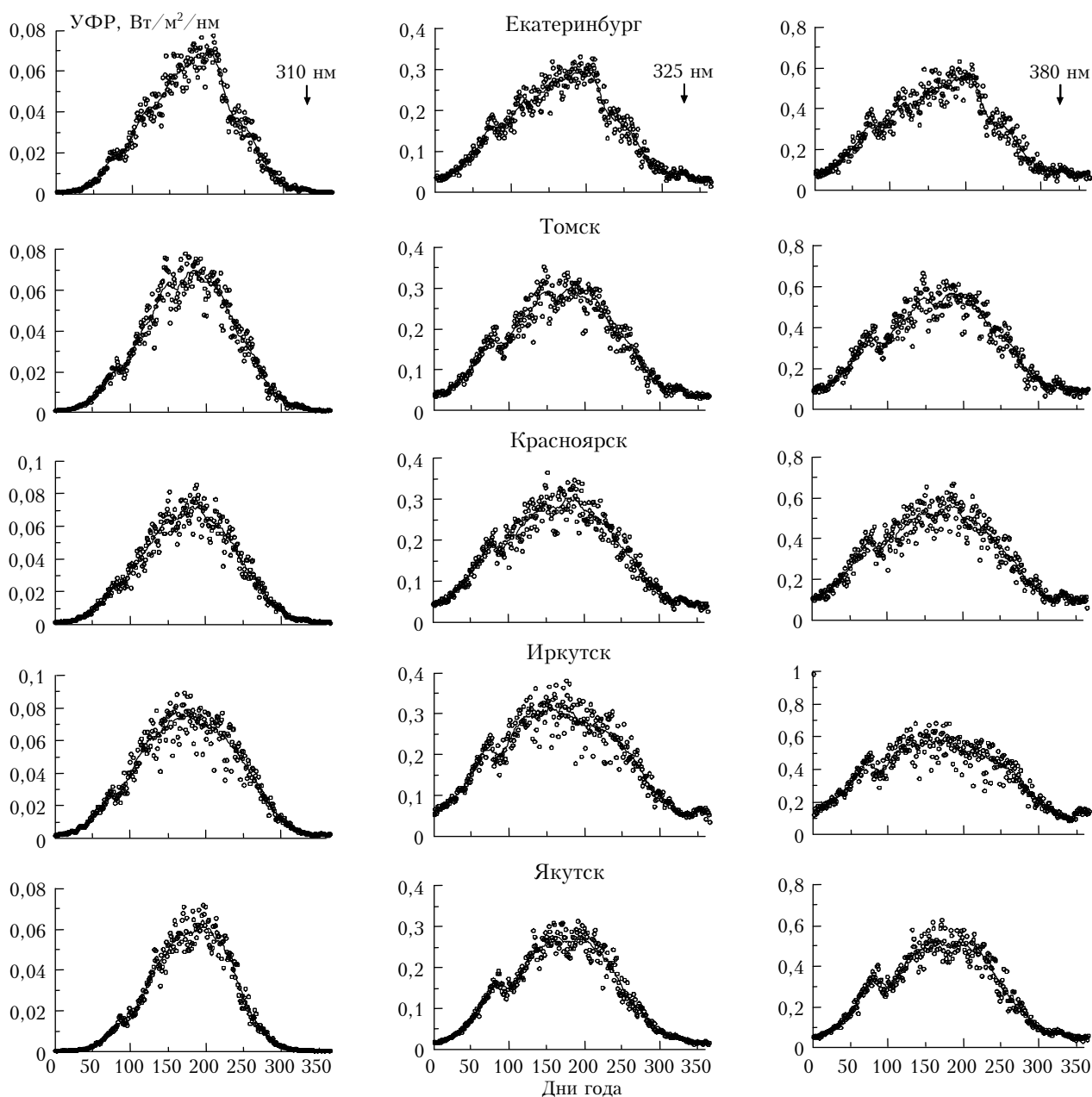


Рис. 1. Среднегодовые значения УФР на длине волны 310, 325 и 380 нм, усредненные скользящим средним по 21 дню

усредненные за период 1997–2003 гг. для 5 городов. Линии соответствуют сглаженным скользящим средним по 21 дню значениям УФР.

Под весенней особенностью (в дальнейшем просто особенностью) в вариациях приземной УФР будем понимать уменьшение значений УФР после локального максимума и продолжающийся рост значений после локального минимума во временной промежуток 60–100-й день года, что соответствует периоду март – начало апреля. Сглаживание с помощью 21-дневного скользящего среднего обусловлено необходимостью исключения влияния вариаций метеопараметров и, в частности, прозрачности атмосферы с масштабами времен жизни циклонов и антициклонов (2–5, 6–8 сут) или серии циклонов и заключительного антициклона (10–12 и 17–18 сут) [7]. Такое сглаживание позволяет выделить особенность во всех рассматриваемых городах на длинах волн 325 и 380 нм, тогда как на длине волны 310 нм особенность выделить не удастся. Таким образом, основной вклад в формирование особенности, обнаруженной ранее в интегральной эритемной УФР в работах [1, 2], дает более длинноволновая часть спектра (325–380 нм).

В работах [1, 2] рассматриваемая особенность связывалась с выраженным сезонным ходом ОСО с максимумом в первой половине года. Известно, что в рассматриваемом спектральном диапазоне длин волн 340–380 нм основное влияние на ослабление УФР оказывают аэрозольное и молекулярное (рэлеевское) рассеяния, а на долю ОСО приходится ~0,1% [8]. Из полученных результатов можно предположить, что ОСО не влияет на формирование весенней особенности УФР.

В работе [3] была выделена асимметрия сезонного хода УФР относительно летнего солнцестояния, которая заключается в превышении значений УФР во втором полугодии по сравнению с первым при одинаковых угловых высотах Солнца. В [3] предполагалось, что асимметрия обуславливается наличием выраженного сезонного хода ОСО и метеорологическими особенностями региона. В работе [9], помимо описанной асимметрии на длине волны 310 нм, приводится сезонный ход УФР на длине волны 345 нм, который характеризуется весенней особенностью в период март – начало апреля, а также общим повышением уровня УФР в весенний период по сравнению с осенним на 30%.

На рис. 2 приведены сглаженные скользящим средним по 21 дню вариации приземной УФР на длинах волн 310 и 380 нм для двух сезонов в зависимости от угловой высоты Солнца в г. Иркутске.

Диапазон угловых высот 30–40° соответствует временному интервалу 60–100-й день года. В остальных рассматриваемых городах поведение УФР для двух сезонов схоже. На рис. 2 наблюдается асимметрия сезонного хода для длины волны 310 нм, что согласуется с результатами работы [3]. На длине 380 нм отмечается превышение уровня УФР в весенний период по сравнению с осенним в среднем на 40%.

Весенняя особенность сезонного хода приземной ультрафиолетовой радиации в некоторых регионах России 207
6. Оптика атмосферы и океана, № 3.

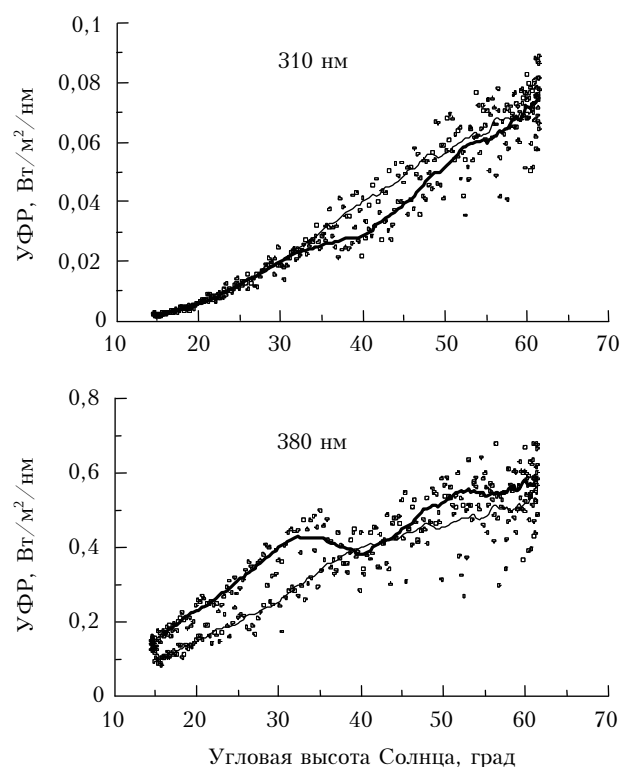


Рис. 2. Сглаженные скользящим средним по 21 дню вариации приземной УФР на длинах волн 310 и 380 нм для двух сезонов в зависимости от угловой высоты Солнца. Тонкая линия – 1-е полугодие, жирная линия – 2-е полугодие

Для дальнейшего рассмотрения особенности были проанализированы данные аэрозольной оптической толщины на длине волны 380 нм и влагосодержания атмосферы в 5 городах по данным актинометрической сети станций «Аэронет». На рис. 3 представлены среднегодовые вариации АОТ и влагосодержания, усредненные для Томска за 2003 и 2006 гг., Красноярска за 2001 и 2004 гг., Иркутска за 2004 и 2006 гг., Якутска за 2006 и 2007 гг. Для Екатеринбурга представлены данные за 2006 г. Из рис. 1 и 3 следует, что в рассматриваемом временном масштабе весенней особенности связи между вариациями УФР и АОТ не наблюдается.

Для дальнейшего анализа было произведено разделение исходного массива значений УФР на длине волны 380 нм на ясные и облачные дни. Были подсчитаны коэффициенты корреляции между УФР в ясные и облачные дни и АОТ и влагосодержанием, а также между исходными значениями УФР и УФР, разделенной на ясные и облачные дни во временном интервале 50–110-й день года.

Полученные результаты приведены в таблице, из которой следует, что весенняя особенность в большей степени проявляется в ясные дни. Низкие коэффициенты корреляции и антикорреляции говорят о слабом влиянии АОТ и влагосодержания на УФР в период весенней особенности.

На рис. 4 представлены сглаженные среднегодовые значения интенсивности УФР для Иркутска.

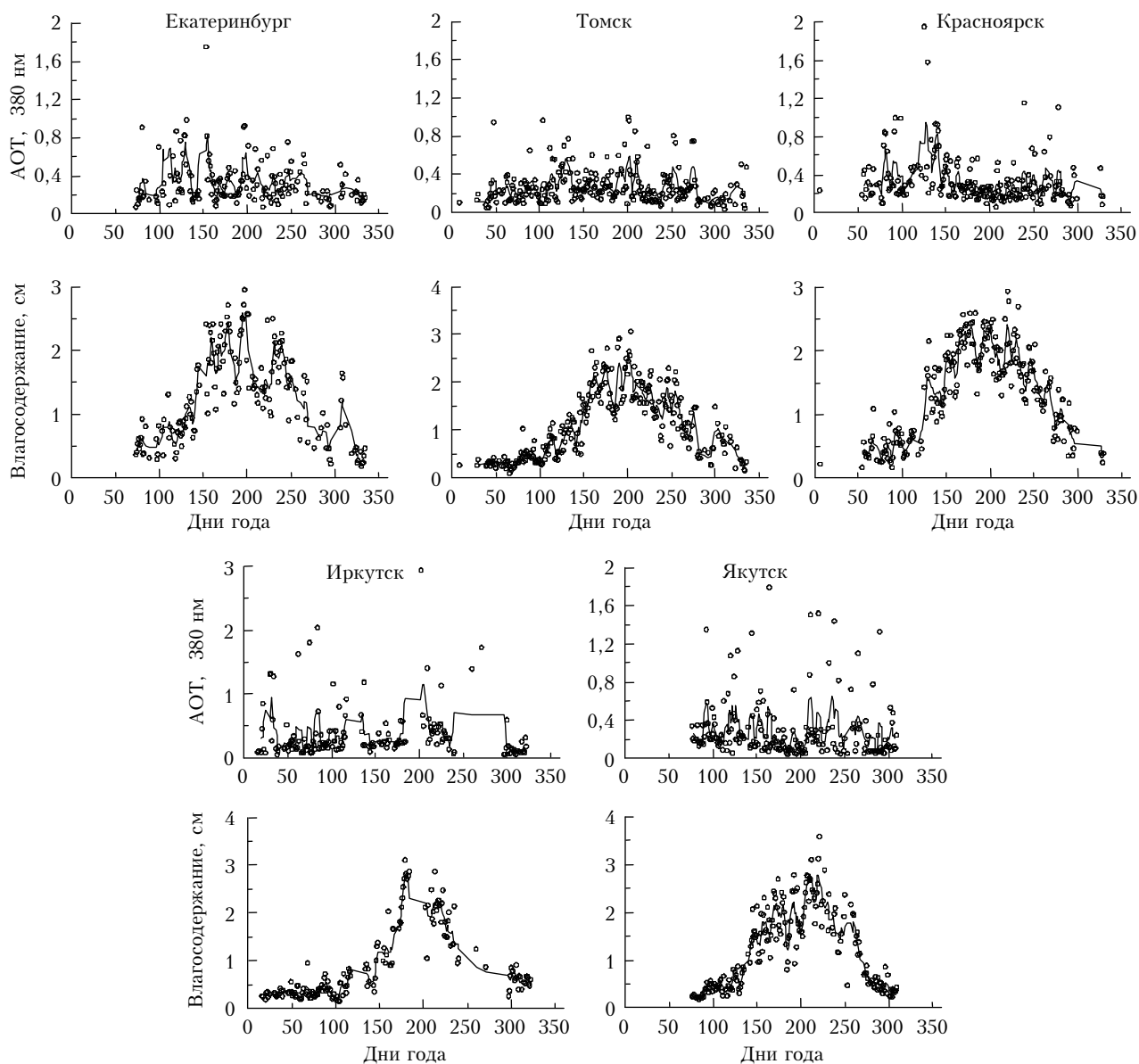


Рис. 3. Сглаженные скользящим средним по 5 дням среднегодовые значения аэрозольной оптической толщины на длине волны 380 нм и влагосодержания атмосферы для 5 городов

Данные корреляционного анализа для 5 городов

Город	УФР					
	Исходный массив		Ясные дни		Облачные дни	
	ясные дни	облачные дни	АОТ	влагосодержание	АОТ	влагосодержание
Екатеринбург	0,84(60)	0,73(58)	0,22(21)	0,31(21)	0,32(20)	0,31(20)
Красноярск	0,70(60)	0,51(59)	0,27(47)	0,18(47)	0,15(46)	0,04(46)
Томск	0,84(58)	0,64(57)	-0,20(49)	0,38(49)	-0,10(49)	0,31(49)
Иркутск	0,74(59)	0,56(56)	0,04(42)	0,01(42)	0,06(37)	-0,16(37)
Якутск	0,90(60)	0,88(58)	-0,28(38)	-0,53(38)	-0,34(37)	-0,29(37)

Примечание. В скобках указано количество значений.

Ось ординат для УФР на длине волны 380 нм сдвинута с целью визуального сопоставления максимальных уровней интенсивностей в летний и осенний периоды.

Видно, что в летний и осенний периоды поведение кривых одинаково, однако в период весенней особенности наблюдается превышение амплитуды интенсивности УФР на длине волны 380 нм. Таким

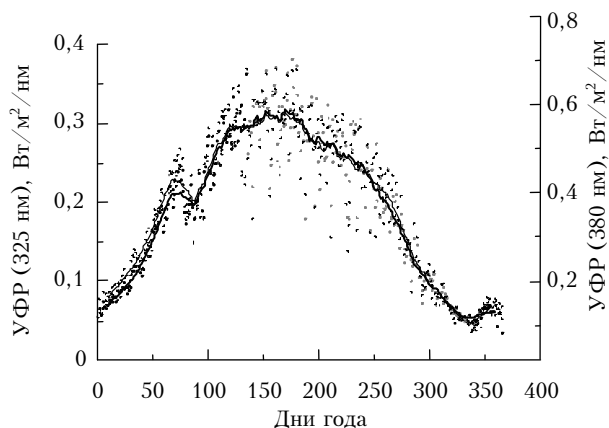


Рис. 4. Сглаженные скользящим средним по 21 дню среднегодовые значения интенсивности УФР на длинах волн 325 и 380 нм для г. Иркутска

образом, особенность является спектрально-зависимой, т.е. амплитуда вариаций УФР в период весенней особенности возрастает с длиной волны. Спектральная зависимость наблюдаемого эффекта и, в частности, слабое его проявление на длине волны 310 нм могут быть обусловлены одновременным действием эффектов рэлеевского рассеяния, поглощения озоном и эффектами многократного переотражения. Сочетание указанных эффектов привлекается в работе [7] для интерпретации особенностей спектрального распределения УФР в области 320–340 нм для снежных условий. Кроме того, альbedo снега имеет тоже спектральную зависимость и согласно работе [10] — максимум в диапазоне 360–420 нм.

Исключение на предварительном этапе влияния ОСО, АОТ и влагосодержания на формирование весенней особенности делает необходимым рассмотрение других определяющих факторов. Во многих

работах указывается на существенную роль альbedo (в особенности снежного покрова) в формировании суммарной УФР. Так, в работах [11–13] указывается, что для УФ-диапазона спектра из естественных подстилающих поверхностей только снег обладает значительным альbedo, достигающим для свежеснеженного снега 80–85%. В [11] установлено, что снежный покров увеличивает ежемесячные дозы эритемной суммарной УФР более чем на 20%.

На рис. 5 показаны сглаженные скользящим средним по 21 дню среднегодовые значения интенсивности УФР на длине волны 325 нм (спутниковые данные) и среднемесячные суммы рассеянной радиации, сглаженные по 21 дню (данные работы [14], диапазон 0,4–1 мкм).

Видно, что в период рассматриваемой особенности резко падает уровень рассеянной радиации, что приводит к снижению интенсивности суммарной УФР на длине волны 325 нм. Период весенней особенности — март, апрель — соответствует периоду схода устойчивого снежного покрова, при этом альbedo подстилающей поверхности в среднем падает до 20–25% [14].

Из рис. 6, где представлены вариации УФР на длине волны 380 нм, видно, что период проявления рассматриваемой особенности для разных городов различен.

Так, если рассмотреть время локального максимума особенности, то в Иркутске это 68-й день, Томске 73-й, Красноярске 74-й, Екатеринбурге 78-й, Якутске 81-й день, т.е. особенность распространяется по направлению с юга на север, что соответствует направлению естественного механизма таяния снега.

Таким образом, можно предположить, что в период весенней особенности (март–апрель) сход устойчивого снежного покрова приводит к падению уровня альbedo, что снижает уровень рассеянной и, как

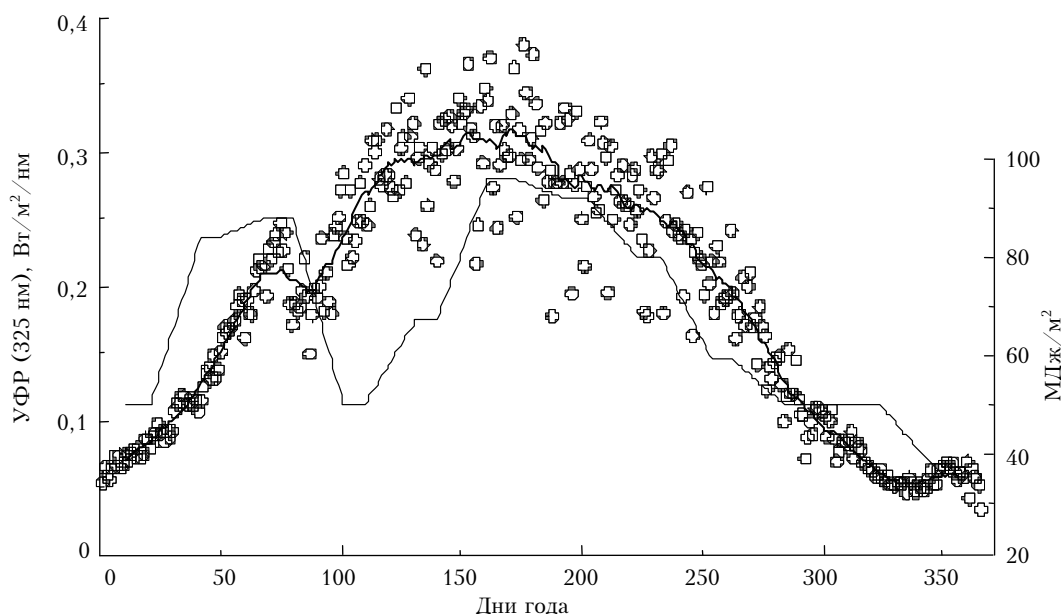


Рис. 5. Сглаженные скользящим средним по 21 дню среднегодовые значения интенсивности УФР на длине волны 325 нм (левая шкала, тонкая линия) и среднемесячные суммы рассеянной радиации, сглаженные по 21 дню (правая шкала, жирная линия), для г. Иркутска

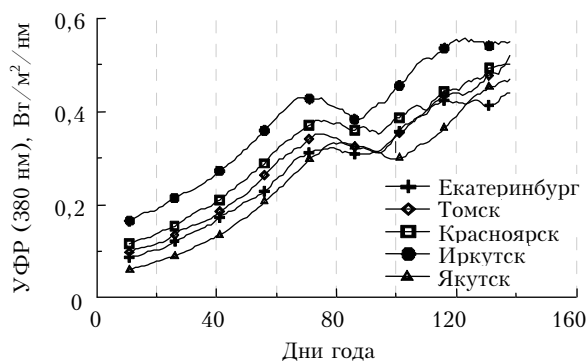


Рис. 6. Вариации УФР на длине волны 380 нм для 5 городов

следствие, суммарной УФР на фоне сравнительно низкой угловой высоты Солнца в начале весны. Растущая угловая высота Солнца со временем увеличивает поток прямой УФР, что вновь приводит к постепенному росту суммарной УФР.

Заключение

В результате проведенного анализа особенности сезонного хода приземной ультрафиолетовой радиации можно сделать следующие основные выводы.

Весенняя особенность вариаций УФР, которая заключается в отклонении от естественного сезонного хода, определяемого угловой высотой Солнца, проявляется на длинах волн 325 и 380 нм. На длине волны 310 нм особенность не отмечается или слабо выражена, что может указывать на то, что ОСО не влияет на формирование весенней особенности УФР. Основной вклад в формирование особенности в интегральной УФР вносит более длинноволновая часть спектра (325–380 нм).

В период весенней особенности наблюдается превышение амплитуды интенсивности УФР на длине волны 380 нм по сравнению с более коротковолновым УФ-излучением. Рассмотренная особенность является спектрально-зависимой, амплитуда вариаций УФР в период весенней особенности возрастает с длиной волны.

Обнаруженная ранее асимметрия сезонного хода УФР для длины волны 345 нм по наземным данным обнаруживается по спутниковым данным УФР на длине волны 380 нм. Наблюдаемое превышение уровня УФР на длине волны 380 нм в весенний период по сравнению с осенним составляет в среднем 40%.

Корреляционной связи между АОТ и УФР в период весенней особенности не выявлено, что может свидетельствовать о малом влиянии АОТ на формирование особенности УФР.

Предположительно, весенняя особенность интерпретируется сходом устойчивого снежного покрова,

что приводит к падению уровня альбедо и, как следствие, к снижению уровня рассеянной и, соответственно, суммарной УФР на фоне сравнительно низкой угловой высоты Солнца в начале весны. Растущая угловая высота Солнца со временем увеличивает поток прямой УФР, что вновь приводит к постепенному росту суммарной УФР.

1. Черниговская М.А., Михалев А.В., Тащилин М.А. Многолетние вариации эритемной ультрафиолетовой радиации в регионах Сибири по данным спутниковых измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 12. С. 1095–1103.
2. Михалев А.В., Тащилин М.А. Некоторые задачи солнечно-земной физики, связанные с образованием и динамикой атмосферного аэрозоля // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 555–558.
3. Михалев А.В., Черниговская М.А., Шалин А.Ю. Нерегулярные вариации приземной ультрафиолетовой радиации // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 2. С. 189–193.
4. Ren P.B.C., Gjessing Y., Sigernes F. Measurements of solar ultraviolet on the Tibetan Plateau and comparisons with discrete ordinate method simulations // J. Atmos. and Terr. Phys. 1999. V. 61. N 6. P. 425–446.
5. McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., Herman J.R. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. NASA Goddard Space Flight Center. 1998. 70 p.
6. Тащилин М.А. Комплекс программ по обработке данных эритемной ультрафиолетовой радиации спутника Earth Probe // Солнечно-земная физика. 2004. Вып. 5. С. 130–133.
7. Чубарова Н.Е. Ультрафиолетовая радиация у земной поверхности: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: МГУ, 2007. 48 с.
8. Банах Г.Ф., Ипполитов И.И., Лопасова Т.А. Влияние атмосферы на коротковолновую границу солнечной УФ-радиации у поверхности Земли // Косм. исслед. 1986. Т. 24. Вып. 6. С. 890–895.
9. Михалев А.В., Тащилин М.А., Черниговская М.А., Шалин А.Ю. Эритемная ультрафиолетовая радиация по данным наземных и спутниковых измерений // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 63–67.
10. Warren J.W., Warren S.G. A Model for the Spectral Albedo of Snow. I: Pure Snow // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37. N 12. P. 2712–2733.
11. Udelhofen P.M., Gies P., Roy C., Randel W.J. Surface EV radiation over Australia, 1979–1992: Effects of ozone and cloud cover changes on variations of UV radiation // J. Geophys. Res. D. 1999. V. 104. N 16. P. 19135–19159.
12. Kylling A., Dahlback A., Mayer B. The effect of clouds and surface albedo on UV irradiance at a high latitude site // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27. N 9. P. 1411–1414.
13. Kylling A., Bais A.F., Blumthaler M. Effect of aerosols on solar UV irradiances during the Photochemical Activity and Solar Ultraviolet Radiation campaign // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103. N 20. P. 26051–26060.
14. Швер Ц.А., Форманчук Н.П. Климат Иркутска. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 245 с.

M.A. Tashchilin, A.V. Mikhalev. Spring peculiarity of the surface ultraviolet radiation seasonal process in some Russian regions.

The analysis of spring peculiarity in the surface ultraviolet radiation (SUR) variations has been done in some Russia territories (near Ekaterinburg, Tomsk, Krasnoyarsk, Irkutsk, and Yakutsk), with the help of satellite SUR data received by the TOMS instrument, which is set on Earth Probe satellite, and Aerosol Optical Depth and Water data, received by ground actinometrical AERONET network. Spring peculiarity means the deviation of SUR mean from real seasonal process due to solar zenith angle. The data for the period 1997–2003 have been analyzed. Possible mechanisms of the observed peculiarity in SUR variations are given.