

**М.А. Черниговская, А.В. Михалев, М.А. Тащилин**

## **Пространственные и временные неоднородности полей эритемной ультрафиолетовой радиации над территорией России**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 17.07.2003 г.

На основе данных спутниковых (Earth Probe TOMS) измерений эритемной ультрафиолетовой радиации (ЭУФР) проводится анализ регионального (для России) пространственного распределения ЭУФР. При рассмотрении распределения ЭУФР на территории России проявляются мезомасштабные неоднородности полей ЭУФР, зависящие от региона и рассматриваемого сезона. Обсуждается конкурирующий вклад в наблюдаемые эффекты метеорологических (облачность, аэрозоли) и других факторов, влияющих на ЭУФР. В общем случае поля ЭУФР формируются под влиянием многих атмосферных факторов, на распределение которых могут оказывать влияние орографические условия, степень континентальности, циркуляционные процессы, физико-географические особенности региона.

### **Введение**

Одним из основных факторов, определяющих уровни и вариации приземной ультрафиолетовой радиации (УФР) Солнца, является угловая высота Солнца, которая формирует широтную зависимость УФР. Между тем существуют другие факторы, такие как общее содержание озона (ОСО) в атмосфере Земли, наличие облачного покрова и атмосферного аэрозоля, которые участвуют в формировании полей УФР и связаны с распределениями стратосферных и тропосферных метеорологических параметров, альbedo подстилающей поверхности и др. Эти факторы, являясь наиболее изменчивыми, могут иметь особенности, связанные с физико-географическими и климатическими условиями регионов [1]. Например, в работе [2] при анализе спутниковых данных ОСО выявлены глобальные неоднородности ОСО, совпадающие с очертаниями материков и больших горных массивов. Эти обстоятельства могут приводить к формированию неоднородностей пространственных распределений УФР, нарушающих широтный ход, к появлению долготных или региональных особенностей распределений УФР, в общем случае не совпадающих с неоднородностями ОСО.

Вопросы исследования пространственных неоднородностей УФР, региональных особенностей и их тенденций освещены крайне недостаточно. Между тем существуют работы, указывающие на то, что эффекты в УФР, связанные с региональными особенностями, могут быть значительными. Так, в [3] отмечается, что биологически активная (эритемная) УФР в Новой Зеландии (45° ю. ш.) почти в 2 раза выше, чем в Германии (48° с. ш.), практически на одних широтах. На основе этого решение широко обсуждаемой в последние десятилетия проблемы повышения УФР в связи с истощением озонового слоя невозможно без учета региональных особенностей распределения УФР и их тенденций. Следует отметить, что за счет эффектов многократного рассеяния [4] формирование поля УФ-радиации может отличаться от распределения солнечной радиации более длинноволнового оптического диапазона.

Спутниковые методы измерения УФР представляют собой весьма информативными и ценными в плане решения задачи изучения глобальных пространственных вариаций,

несмотря на некоторые нерешенные методические вопросы (влияние аэрозольной составляющей, альbedo и др.), ограничивающие точность определения УФР [5]. Сопоставление данных спутниковых и наземных методов измерения способствует более глубокому пониманию динамики и морфологии поведения УФР, а также повышению точности методик измерения УФР [6].

В настоящей статье на основе данных спутниковых измерений эритемной ультрафиолетовой радиации (ЭУФР) проводится анализ регионального (для России) пространственного распределения ЭУФР. Эритемная радиация – это наиболее биологически активная спектральная область ультрафиолетовой радиации Солнца в диапазоне 300–320 нм. Повышенный интерес к ЭУФР обусловлен тем, что она подвержена гораздо большему (по сравнению с УФР в других спектральных диапазонах) влиянию ОСО в атмосфере Земли, а также тем, что ЭУФР является важным климатообразующим фактором.

### **Методика обработки данных измерений эритемной УФР**

Спутниковые данные Earth Probe TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) ([http://toms.gsfc.nasa.gov/ery\\_uv/euv.html](http://toms.gsfc.nasa.gov/ery_uv/euv.html)) представляются данными суточных (дневных) глобальных распределений экспозиции ЭУФР поверхности Земли с угловым разрешением  $1^\circ \times 1,25^\circ$  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 данных о внеатмосферном солнечном потоке УФР [5, 7].

Суточные данные распределений ЭУФР отражают текущие значения распределений полей облачности, ОСО, аэрозоля, альbedo подстилающей поверхности. Суммирование или усреднение данных ЭУФР за более длительные интервалы наблюдений позволяют исследовать распределения ЭУФР, обусловленные сезонными вариациями атмосферных параметров и особенностями физико-географических характеристик региона наблюдений.

Для исследования относительного вклада ОСО, облачности и альbedo подстилающей поверхности в наблюдаемые эффекты глобального распределения ЭУФР было проведено разделение массива данных эритемной радиации за 1999 г. на ясные и облачные дни. Такое разделение позволило выделить дни, когда определяющим для ЭУФР являлось распределение ОСО (ясные дни), и дни, когда определяющим в распределении эритемной радиации мог являться облачный режим атмосферы (облачные дни).

Для выделения ясных дней для каждой узловой точки по всем дням выбранного месяца определялись максимальные значения ЭУФР. По совокупности этих значений строилось глобальное распределение ЭУФР для ясных дней. Следует обратить внимание, что полученное таким образом распределение для ясных дней является комбинированным суточным распределением ЭУФР. Для выделения облачных дней в распределении эритемной радиации месячные данные для каждой узловой точки вначале усреднялись методом скользящей средней по трем дням. Затем для каждого дня из первоначальных данных вычиталось усредненное значение для этого дня. Если полученное значение было меньше усредненного, то такой день считался облачным. Значения ЭУФР для каждой координаты затем усреднялись по выявленным за месяц облачным дням. Полученные таким методом значения ЭУФР для ясных и облачных дней использовались для построения изображений глобального распределения ЭУФР.

В работе для анализа были выбраны месячные и годовые интервалы усреднения в период 1999–2001 гг. Процедура получения и обработки данных ЭУФР заключалась в извлечении значений из массивов данных ЭУФР спутника Earth Probe, их последующей обработке и построении конечной битовой матрицы, содержащей 288 × 180 узловых точек по широте и долготе соответственно, отражающей пространственное распределение ЭУФР на поверхности Земли. Были получены глобальные распределения эритемной радиации, усредненные по месяцам и по годам за указанный период.

Ниже анализируются спутниковые усредненные данные ЭУФР Earth Probe TOMS с целью выявления региональных особенностей ЭУФР на территории России.

## Результаты анализа данных и их обсуждение

Для оценки влияния облачности на распределение суммарной ЭУФР по спутниковым данным на рис. 1 в качестве примера показана долготная вариация средней суточной дозы ЭУФР вдоль широтного круга 20° с. ш. для января 1999 г. для всех исходных, ясных и облачных дней. При этом использовалась методика выделения ясных и облачных дней из исходного массива данных, описанная в предыдущем разделе.

Как видно из рис. 1, распределение по облачным дням в большей степени коррелирует с исходным распределением. Коэффициент корреляции для исходных и облачных дней равен 0,96, для исходных и ясных дней 0,65. Этот факт может свидетельствовать об определяющей роли облачного покрова в формировании неоднородностей в распределении ЭУФР при усреднении на больших временных масштабах.



Рис. 1. Экспозиция (доза) ЭУФР вдоль 20° с. ш. для января 1999 г.: кривая 1 – все исходные; 2 – ясные; 3 – облачные дни

Для анализа пространственных вариаций строились средние за месяц карты изолиний суммарной эритемной радиации для широтно-долготной области, включающей территорию России (>20° в. д.), и долготные вариации ЭУФР для фиксированных широт. На рис. 2 представлены карты изолиний ЭУФР для отдельных месяцев, относящихся к различным сезонам года.

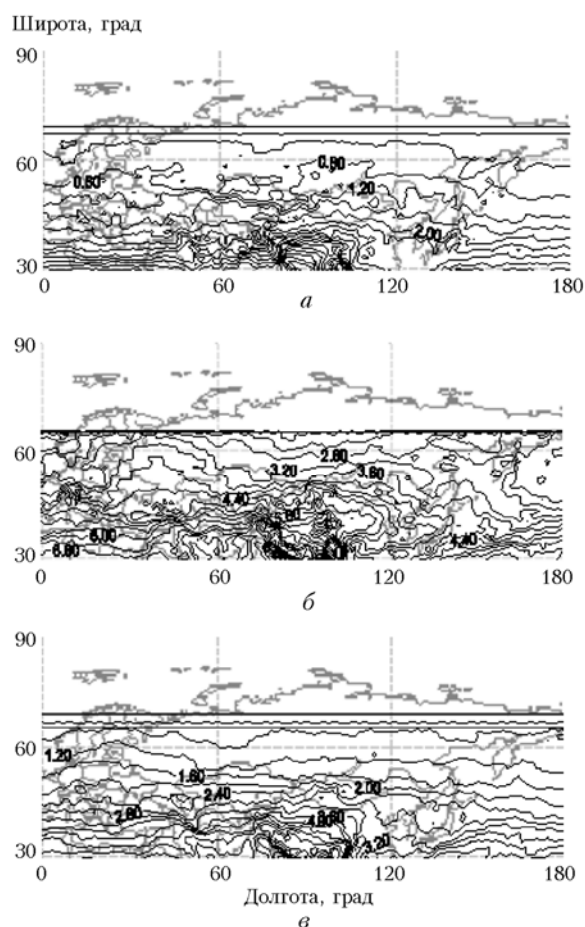


Рис. 2. Изолинии средних суточных экспозиций суммарной ЭУФР за 1999 г.: а – март; б – июнь; в – сентябрь

На рис. 3 представлены долготные вариации суммарной ЭУФР для фиксированных широт 52° (верхняя кривая) и 60° с. ш. (нижняя кривая), усредненные для июня 1999–2001 гг.

Из рис. 3 видно, что в средних за месяц суточных экспозициях суммарной ЭУФР отмечаются отклонения от естественного широтного хода ЭУФР, обусловленного различными угловыми высотами Солнца. Эти отклонения приводят к долготным вариациям ЭУФР на фиксированных широтах, которые в июне могут достигать 20–30%. Наименьшими средними значениями ЭУФР характеризуется район Приморья и Дальнего Востока (> 130° в. д.), что, возможно, связано с увеличением облачности в этом районе. Повышенными значениями ЭУФР выделяется регион Среднесибирского плоскогорья (90–130° в. д.).

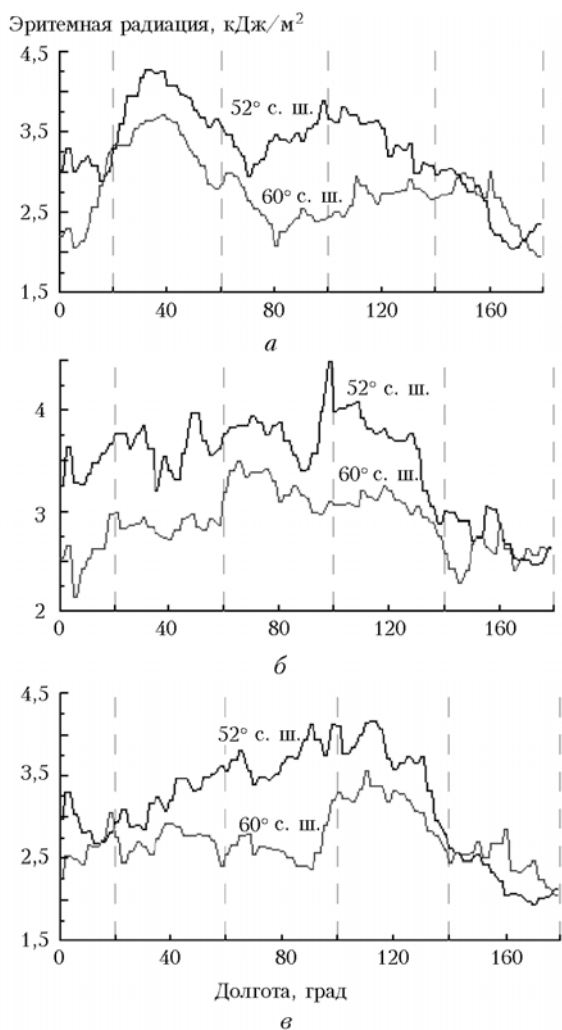


Рис. 3. Долготные вариации суммарной ЭУФР, усредненные для июня: а – 1999 г.; б – 2000 г.; в – 2001 г.

В средних за месяц суточных экспозициях ЭУФР на территории России проявляются крупномасштабные и мезомасштабные неоднородности полей ЭУФР, обусловленные, вероятно, региональными особенностями (физико-географическими, орографическими, климатическими и др.). Крупномасштабные неоднородности ЭУФР в отдельных случаях могут быть сопоставлены с географическими структурами – Восточно-Европейской равниной, Западно-

Сибирской низменностью, Среднесибирским плоскогорьем, районами Приморья и Дальнего Востока.

Прослеживаются также межгодовые вариации распределения ЭУФР на территории России. На 52° с. ш. для июня 1999 г. можно выделить наибольшие значения ЭУФР в европейской части России и тенденцию снижения ЭУФР к региону Дальнего Востока (рис. 3,а). Для июня 2000 г. прослеживается увеличение ЭУФР при переходе из европейской части к району Среднесибирского плоскогорья, т.е. изменяется характер долготной зависимости (рис. 3,б). Наибольшие значения ЭУФР отмечаются в районе Среднесибирского плоскогорья, затем – спад к региону Дальнего Востока. В 2001 г. тенденция увеличения ЭУФР при переходе из европейской части России к району Среднесибирского плоскогорья имеет более выраженный характер (рис. 3,в).

Межгодовые вариации долготного распределения ЭУФР прослеживаются и на 60° с. ш. со своими особенностями. Область наибольших значений ЭУФР, наблюдаемая в июне 1999 г. в европейской части России, перемещается в июне 2000 г. в район Западно-Сибирской низменности, а в июне 2001 г. отмечается в районе Среднесибирского плоскогорья.

Если ввести условную угловую скорость перемещения областей максимальных значений ЭУФР, которые можно выявить из рис. 3, то ее величина будет составлять для рассмотренных случаев ~30–40 град/год, что соответствует периодам 9–12 лет.

Примером мезомасштабных неоднородностей может быть поведение ЭУФР на 52° с. ш. в июне 2000 г. в диапазоне 90–100° в. д. (см. рис. 3,б), когда величина средней дневной экспозиции ЭУФР изменялась от ~3,4 до 4,4 кДж/м<sup>2</sup>. В различные сезоны уровни мезомасштабных неоднородностей могут быть различными. Так, для 1999 г. в марте (см. рис. 2,а) широтно-долготное распределение ЭУФР более структурировано по сравнению с сентябрем (см. рис. 2,в), что может быть связано с весенней перестройкой и неустойчивостью циркуляционного режима атмосферы, а также с особенностями годового хода ОСО.

В работе [8] представлены данные расчетов основных характеристик УФ-климата на территории бывшего СССР по теоретической радиационной модели атмосферы. Приведены карты распределений интенсивности и доз прямой, рассеянной и суммарной УФ-радиации для различных участков спектра (в том числе и для эритемной радиации) для разных сезонов года. Так же, как результаты спутниковых данных ЭУФР, представленные в настоящей статье, результаты модельных расчетов [8] показывают существенное отличие разных меридиональных разрезов ЭУФР, проходящих по исследуемой территории, для одного и того же сезона. В июне эти различия могли достигать 25%, в сентябре – не превосходили 10–15%. Авторы связывали этот эффект главным образом с большим влиянием ОСО на УФР в данной области спектра. С этим же связывалось наблюдаемое отклонение изолиний интенсивности полуденных значений ЭУФР к югу над территорией Восточной Сибири и Дальнего Востока для весеннего сезона в связи с наличием там области высоких ОСО. Летом изолинии отклоняются к югу на северо-западе европейской территории России, так как зона повышенного ОСО в этот сезон находится в этом регионе. Осенью и зимой изолинии интенсивности ЭУФР были почти параллельны широтным кругам.

Учет влияния облачности на интенсивность ЭУФР приводил к появлению некоторой неоднородности на од-

ной и той же широте, но изолинии на картах карты распределений интенсивности УФР все же оставались гладкими с некоторыми отклонениями от широтного хода. То есть наряду со сходством в описании общего поведения ЭУФР (проявление долготного эффекта, отклонение от широтного хода УФР) спутниковые данные дают новую, более точную информацию о распределении радиации, такую как более структурированное широтно-долготное распределение ЭУФР с выявлением мезомасштабных неоднородностей и межгодовые вариации распределений ЭУФР.

Подводя итог, можно отметить, что, в общем случае, поля суммарной ЭУФР формируются под влиянием многих атмосферных факторов, включающих облачный режим, аэрозоль, ОСО и другие, на распределение которых могут оказывать влияние орографические условия, степень континентальности, циркуляционные процессы, физико-географические особенности региона, альbedo подстилающей поверхности. Характер и степень влияния этих факторов на распределение ЭУФР требуют дополнительных исследований.

### Выводы

1. При усреднении спутниковых данных TOMS ЭУФР за большие интервалы времени ( $\geq 1$  мес) в пространственных распределениях ЭУФР над территорией России проявляются мезомасштабные неоднородности, что, в ряде случаев, приводит к отклонению от выраженного широтного хода ЭУФР.

2. Для территории России летом долготные неоднородности ЭУФР могут достигать 20–30%. В некоторых случаях эти неоднородности могут быть сопоставлены с географическими структурами – Восточно-Европейской равниной, Западно-Сибирской низменностью, Среднеси-

бирским плоскогорьем, с граничной областью материк-океан на Дальнем Востоке.

3. Отмечаются межгодовые вариации распределений ЭУФР для территории России (по данным за 1999–2001 гг. для июня).

Работа выполнена при поддержке интеграционных проектов СО РАН № 95 и 130, а также в рамках гранта № НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации. Один из авторов пользовался поддержкой INTAS (грант 00-189).

1. Гуральник И.И., Дубинский Г.П., Ларин В.В., Мамиконова С.В. Метеорология. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 440 с.
2. Казимировский Э.С., Матафонов Г.К. Континентальные и орографические «структуры» в глобальном распределении общего содержания озона // Докл. РАН. 1998. Т. 361. № 4. С. 544–546.
3. Seckmeyer G., McKenzie R.L. Increased ultraviolet radiation in New Zealand (45S) relative to Germany (48N) // Nature. 1992. V. 359. N 6391. P. 135–137.
4. Гуцин Г.П. Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 200 с.
5. McPeters R.D., Bhartia P.K., Krueger A.J., and Herman J.R. Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide. NASA Goddard Space Flight Center, 1998. 70 p.
6. Михалев А.В., Тащилин М.А., Черниговская М.А., Шалин А.Ю. Эритемная ультрафиолетовая радиация по данным наземных и спутниковых измерений // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 63–67.
7. Madronich S. Implications of recent total atmospheric ozone measurements for biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface // Geophys. Res. Lett. 1992. V. 19. N 1. P. 37–40.
8. Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Незваль Е.И. Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба. М.: Изд-во МГУ, 1968. 228 с.

*M.A. Chernigovskaya, A.V. Mikhalev, M.A. Tashchilin. Spatial and temporal inhomogeneities of erythemal ultraviolet radiation fields above the Russian territory.*

Using satellite (Earth Probe TOMS) measurements of erythemal ultraviolet radiation (EUVR) we examine the global and regional (for Russia) spatial distributions of EUVR. An examination of the EUVR distribution for the Russian territory reveals mesoscale inhomogeneities of EUVR fields depending on the region and season under consideration. We discuss the competing contribution from meteorological (cloud cover, aerosols) and other factors influencing EUVR in the effects observed. Generally, EUVR fields are produced under the influence of many atmospheric factors whose distribution can be affected by orographic conditions, the degree of continentality, circulation processes, and by the physico-geographic properties of the region.