

А.В. Михалев, М.А. Тащилин, М.А. Черниговская, А.Ю. Шалин

## Эритемная ультрафиолетовая радиация по данным наземных и спутниковых измерений

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

Поступила в редакцию 29.07.2002 г.

Проведен сравнительный анализ полуденных значений прямой эритемной радиации (ЭР) по наземным измерениям в г. Иркутске (Восточная Сибирь) и значениям суммарной ЭР по спутниковым данным (Earth Probe, TOMS). Исследованы межсуточные и сезонные вариации ЭР за период 1999–2001 гг. Выполнен корреляционный анализ наземных и спутниковых данных для отдельных месяцев, полугодий, лет и для массива исходных данных за весь трехлетний интервал. При анализе межсуточных вариаций выделяются периоды с высокой степенью коррелированности между наземными и спутниковыми данными, а также периоды с нарушениями согласованности вариаций. В общем случае отмечаются высокие коэффициенты корреляции (0,84–0,99) между наземными и спутниковыми данными на годовых и полугодичных интервалах. Обсуждаются возможные причины выделенных особенностей и отмечаемых различий в вариациях наземных измерений и спутниковых данных ЭР. По наземным измерениям выделена асимметрия сезонного хода ЭР относительно летнего солнцестояния, заключающаяся в превышении значений ЭР во втором полугодии по сравнению с первым при одинаковых угловых высотах Солнца. По спутниковым данным эта особенность выражена слабее и проявляется при учете дней только с ясной погодой. Отмечается выраженный сезонный ход коэффициентов вариаций ЭР с минимумом в июне.

### Введение

Из всего диапазона ультрафиолетовой радиации Солнца (УФР) с длинами волн 290–400 нм, достигающей поверхности Земли, наиболее биологически активной для всего живого (для человека, в том числе) является спектральная область 300–320 нм. Это так называемая область эритемной радиации (ЭР) (от латинского «эритема» – покраснение). Повышенный интерес к ЭР обусловлен ее зависимостью от общего содержания озона (ОСО) в атмосфере Земли. Исследования ОСО интенсивно проводятся в последние десятилетия в связи с регистрируемыми отрицательными трендами ОСО в глобальном масштабе и наблюдениями в отдельные периоды в некоторых регионах кратковременных аномалий ОСО [1–3]. Изменения ЭР, обусловленные вариациями ОСО, в ряде случаев оказываются сопоставимы или имеют меньшие значения по сравнению с изменениями ЭР различных временных масштабов, связанными с другими геофизическими и метеорологическими факторами. Наибольшие по амплитуде вариации ЭР связаны с угловой высотой Солнца (суточные и сезонные вариации), наличием облачного покрова и атмосферным аэрозолем. В средних широтах эти вариации могут достигать десятки–сотни процентов и более.

Таким образом, вариации ЭР представляют интерес как климатическая характеристика исследуемого региона и как важный параметр, определяющий дисперсию месячных и годовых сумм ЭР, учет которых необходим при определении трендов ЭР.

В работах [4, 5] отмечались некоторые особенности вариаций УФР в регионе Восточной Сибири – асимметрия сезонного хода УФР, сезонный ход коэффициентов вариации УФР, кратковременные увеличения УФР, полученные по данным наземных измерений прямой УФР в отдельных участках ультрафиолетового спектра (296–346 нм). В настоящей статье исследуются проявления отмеченных в работах [4, 5] особенностей УФР в вариациях ЭР по данным наземных и спутниковых измерений. Сравнительный анализ результатов наземных измерений интенсивности приземной ЭР с информацией об ЭР, оцениваемой по спутниковым данным, является к тому же проверкой достоверности проводимых экспериментальных измерений.

### Аппаратура и методики наблюдений ЭР

Наземные наблюдения околополуденной приземной УФР в г. Иркутске (52° с.ш., 104° в.д.) проводятся в диапазоне длин волн 296–346 нм с помощью спектрометра, созданного на базе комплекса «КСВУ-12» (ЛОМО) и ЭВМ типа IBM AT. Описание аппаратуры и методики измерения прямой УФР с помощью УФ-спектрометра подробно дано в работе [6]. Используя результаты измерений, мы определяли величину ЭР согласно [7]:

$$I_{ery} = \int_{280 \text{ нм}}^{400 \text{ нм}} A(\lambda) I(\lambda) d\lambda;$$

$$A(\lambda) = \begin{cases} 1,0 & \dots\dots\dots \lambda \leq 298 \text{ нм} \\ 10^{0,094(298-\lambda)} & \dots\dots 299 \text{ нм} \leq \lambda \leq 328 \text{ нм} \\ 10^{0,015(139-\lambda)} & \dots\dots\dots \lambda \geq 329 \text{ нм} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $I_{ery}$  – интенсивность эритемной радиации;  $\lambda$  – длина волны;  $A(\lambda)$  – функция эффективности;  $I(\lambda)$  – интенсивность УФР.

Помимо данных наземных измерений приземной ЭР, проводимых в различных регионах Земли, исследователям доступна информация об ЭР, оцениваемая по спутниковым данным TOMS (Earth Probe, Total Ozone Mapping Spectrometer [http://toms.gsfc.nasa.gov/ery\\_uv/euv.html](http://toms.gsfc.nasa.gov/ery_uv/euv.html)) [8, 9]. По этой методике приземная эритемная радиация восстанавливается путем совместного анализа данных спутниковых измерений ОСО прибором TOMS, информации о состоянии облачности атмосферы, полученной на основе анализа ее способности отражать излучение на длине волны 360 нм, а также с внеатмосферным солнечным потоком УФР, измеренным, например, на борту UARS NASA. Более подробное описание аппаратуры и методики измерения ЭР с помощью спутниковых приборов дано в [9, 10].

Для анализа ЭР в г. Иркутске были выбраны данные TOMS с ближайшими к городу координатами (52,5° с.ш., 103,75° в.д.).

## Результаты наблюдений и обсуждение

### Общее сравнение наземных и спутниковых данных ЭР

В работах [4, 5, 11] были исследованы особенности поведения приземной УФР на длинах волн 310, 324 и 345 нм. Вариации УФР на длине волны 310 нм качественно должны совпадать с вариациями эритемной радиации. Это обусловлено тем, что максимум эффективного эритемного действия солнечного излучения находится вблизи 310 нм. На рис. 1 показаны

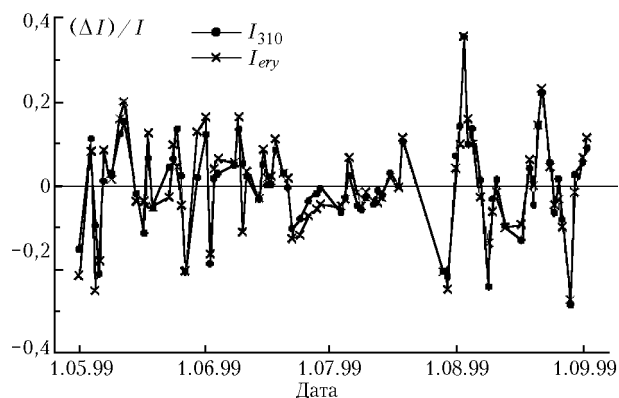


Рис. 1. Относительные вариации  $I_{ery}$  и  $I_{310}$  по наземным измерениям

изменения околополюденных значений интенсивности УФР на длине волны 310 нм ( $I_{310}$ ) и интенсивности ЭР ( $I_{ery}$ ) в течение лета 1999 г. относительно

среднего сезонного хода по данным наземных измерений. Из рис. 1 видна высокая степень подобия этих кривых. В связи с этим далее мы ограничимся рассмотрением только ЭР, измеренной наземным и спутниковым методами за 3-летний период с 1999 по 2001 г.

На рис. 2 представлена временная зависимость суммарной эритемной радиации  $E$  по спутниковым данным и прямой околополюденной интенсивности  $I_{ery}$  по наземным данным за первое полугодие 2000 г. Межсуточная изменчивость наземных измерений выше, чем спутниковых. Из рис. 2 видно, что в целом

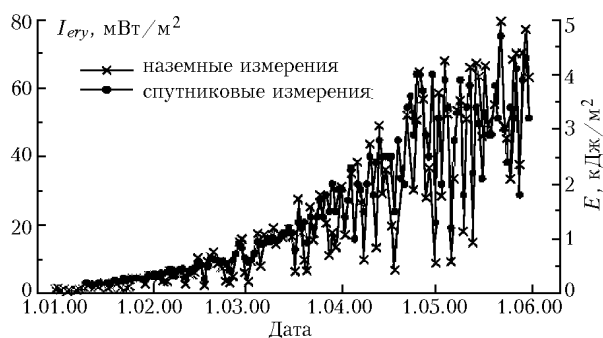


Рис. 2. Эритемная радиация по наземным ( $I_{ery}$ ) и спутниковым ( $E$ ) измерениям

межсуточные вариации ЭР по наземным и спутниковым измерениям хорошо коррелируют, но при внимательном рассмотрении все же выделяются периоды, когда корреляция нарушалась.

На наш взгляд, эти различия могут быть вызваны несколькими причинами. Наземные измерения представлены прямой ЭР, которая более изменчива, чем суммарная, представленная по спутниковым измерениям.

Сказывается пространственное разрешение спутника, которое на широте Иркутска составляет  $\sim 70 \times 140$  км. Поэтому спутниковые измерения представляют интегрированные (в масштабах указанной пространственной ячейки) данные.

Далее, в спутниковых данных ЭР вероятны ошибки, вызванные тем, что альbedo снега и облака близки и поэтому зимой может возникать неопределенность из-за влияния облачности и снежного покрова. Кроме того, не учитывается влияние реального аэрозоля. Для описания состояния атмосферы используются климатические модели.

И наконец, могут возникать различия, связанные с несинхронностью наземных и спутниковых измерений, из-за чего измерения могут проводиться при несколько отличных синоптических условиях.

В общем случае отмечают высокие коэффициенты корреляции (0,84–0,99) на годовых и полугодичных интервалах наблюдений (таблица). В таблице, кроме исходных, приводятся данные, усредненные по 31 дню скользящим средним.

Коэффициенты корреляции наземных и спутниковых данных

Данные		1999–2001 гг.	1999 г.		2000 г.		2001 г.	
			Полугодие					
			I	II	I	II	I	II
Все дни	Исходные ряды	0,925	0,897	0,839	0,955	0,953	0,942	0,964
	Усредненные ряды	0,979	0,990	0,982	0,985	0,994	0,995	0,994
Ясные дни	Исходные ряды	0,958	0,946	0,940	0,978	0,972	0,951	0,974
	Усредненные ряды	0,976	0,992	0,989	0,994	0,994	0,987	0,996

### Особенности сезонного хода ЭР

В работах [4, 5, 11] для региона Восточной Сибири выделена асимметрия сезонного хода УФР относительно летнего солнцестояния. Предполагалось, что эта асимметрия обуславливается наличием выраженного сезонного хода общего содержания озона и метеорологическими особенностями региона. Оказалось, что несимметричность сезонного хода проявляется и в ЭР, которая заключается в превышении ЭР во втором полугодии по сравнению с первым при одинаковых угловых высотах Солнца (рис. 3).

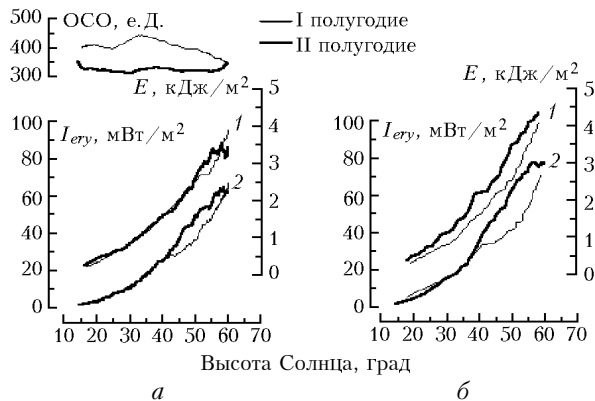


Рис. 3. Средние за 1999–2001 гг. сглаженные сезонные вариации в зависимости от угловой высоты Солнца по спутниковым и наземным измерениям ЭР и ОСО для всех дней наблюдений (а); ЭР для ясных дней наблюдений (б). Кривые 1 – суммарная суточная доза  $E$  (спутниковые измерения); кривые 2 – прямая полуденная интенсивность  $I_{ery}$  (наземные измерения)

На рис. 3,а представлены средние за 1999–2001 гг. вариации ЭР по полугодиям в зависимости от угловой высоты Солнца для наземных (прямая полуденная интенсивность  $I_{ery}$ , кривые 2) и спутниковых данных (суммарная суточная доза  $E$ , кривые 1). Ряды данных за каждый год включали информацию по всем дням. После усреднения за три года полученный ряд сглаживался скользящим средним по 21 дню. Из рисунка видно, что значения наземных данных ЭР во втором полугодии в диапазоне угловых высот Солнца 40–60° (сентябрь, август, июль) превышают на 40–50% соответствующие значения ЭР первого полугодия (апрель, май, июнь). Такая асим-

метрия сезонного хода ЭР относительно летнего солнцестояния может быть обусловлена, как и в случае анализа сезонных вариаций УФР, выраженным годовым ходом ОСО над регионом [12] с максимумом в первой половине года. Средняя за три года сглаженная кривая вариаций ОСО по спутниковым измерениям, как функция угловой высоты Солнца, также приведена на рис. 3,а на верхней панели. Асимметрия сезонного хода ЭР в спутниковых данных по всем дням наблюдений практически отсутствует.

Для определения воздействия облачности на сезонный ход ЭР из рядов наблюдений были исключены облачные дни. Полученный результат для ясных дней наблюдений представлен на рис. 3,б. Поведение интенсивности прямой ЭР по наземным данным (кривые 2) качественно не изменилось. Величина сезонной асимметрии при больших угловых высотах Солнца, которая в случае анализа всех дней наблюдений несколько компенсировалась влиянием облачности, еще более увеличилась. В поведении суммарной ЭР по спутниковым наблюдениям (кривые 1) для ясных дней проявилось влияние сезонности ОСО для всех рассматриваемых угловых высот Солнца, которое, по-видимому, было скрыто из-за влияния облачности.

Однако при малых угловых высотах Солнца (< 40°) асимметрия в наземных данных отсутствует как для всех дней наблюдений, так и для ясных дней. Отсутствие отклика данных наземных измерений ЭР на 20–25-процентное сезонное отличие ОСО при малых угловых высотах Солнца может быть связано с ростом оптической массы в этом случае и, следовательно, с усилением роли процессов рассеяния (аэрозольного и рэлеевского) на проходящее через атмосферу излучение. При этом интенсивность прямой ЭР будет уменьшаться из-за ослабления вследствие рассеяния, а в суммарной ЭР (по спутниковым данным) это явление будет проявляться меньше, поскольку рассеяние аэрозолями приводит к перераспределению доли прямой и рассеянной радиации, незначительно изменяя суммарный поток.

### Сезонный ход коэффициентов вариаций ЭР

На рис. 4 приведены коэффициенты вариаций ЭР по наземным ( $I_{ery}$ ) и спутниковым ( $E$ ) наблюдениям

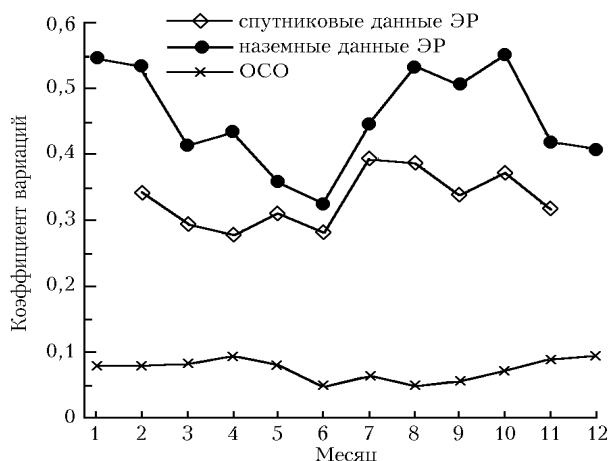


Рис. 4. Средние за 1999–2001 гг. коэффициенты вариаций ОСО и ЭР по наземным и спутниковым измерениям

и ОСО. Эти коэффициенты определялись как усредненное за три года отношение дисперсии к среднемесячному значению ЭР или ОСО для конкретных месяцев года. Значения коэффициентов вариаций ЭР по спутниковым данным за январь и декабрь не приведены, поскольку они представлены малым количеством данных и не являются достоверными. Можно отметить, что прямая ЭР (наземные измерения) более изменчива по сравнению с суммарной ЭР (спутниковые измерения), но общий ход двух кривых, в целом, повторяется. Сходство проявляется в увеличении изменчивости ЭР во второй половине года и в минимальной изменчивости в конце первой половины года.

Сезонный ход коэффициента вариаций ОСО не имеет общих черт с сезонным ходом коэффициента вариаций ЭР. Это может служить подтверждением того, что не колебания ОСО играют определяющую роль в вариациях интенсивности ЭР, а изменения метеопараметров, характеризующих синоптическую обстановку в регионе наблюдения. Только в июне отмечается четкий минимум для всех рассматриваемых параметров. В июне отмечается наибольшее в году количество ясных дней [13], что приводит к минимальному значению коэффициента вариаций данных наземных и спутниковых измерений ЭР в результате малого влияния облачности. Минимальное за год относительное изменение ОСО в этом месяце также способствует уменьшению изменчивости ЭР, что отражается на коэффициентах вариаций прямой (наземные измерения  $I_{ery}$ ) и суммарной (спутниковые измерения  $E$ ) эритемной радиации.

Следует отметить, что выделенный сезонный ход коэффициентов вариации необходимо учитывать при определении долговременных трендов УФ-радиации.

### Кратковременные увеличения ЭР

В работе [5] нами были исследованы события кратковременных увеличений УФР в августе 1999 г. на длинах волн 310, 324 и 345 нм, которые в одних случаях сопровождалось снижением ОСО, а в других – не сопровождалось таким снижением. Было отме-

чено, что сочетание таких параметров, как большая угловая высота Солнца, пониженное ОСО и высокая прозрачность атмосферы, может привести к наложению эффектов и существенным кратковременным увеличениям УФР. Такое увеличение УФР, в частности, наблюдалось нами в августе 1999 г. Как уже отмечалось выше, вариации ЭР имеют сходный характер с вариациями УФР на длине волны 310 нм. Поэтому представляло интерес поведение ЭР как интегральной спектральной характеристики, полученной по наземным и спутниковым наблюдениям, для этого же интервала времени. На рис. 5 показаны вариации ЭР в ясные дни наблюдений относительно сезонного хода по наземным и спутниковым измерениям.

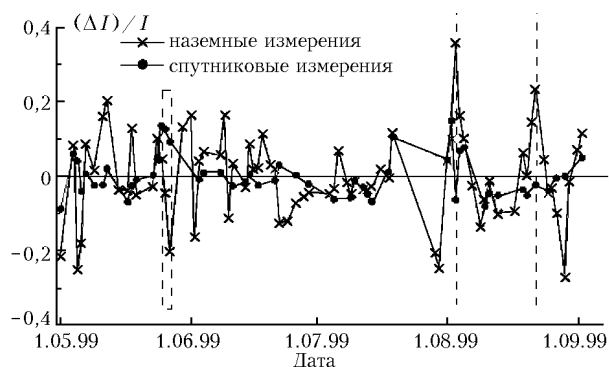


Рис. 5. Относительные вариации ЭР по наземным ( $I_{ery}$ ) и спутниковым ( $E$ ) измерениям для ясных дней наблюдений

Анализируя рис. 5, можно отметить, во-первых, заметно меньшую изменчивость ЭР ( $E$ ), полученную по спутниковым данным, во-вторых, – значительные ежедневные расхождения этих двух рядов. Так, описанные выше события августа 1999 г. отчетливо проявляются в наземных данных, но отсутствуют в спутниковых данных. С другой стороны, 25–27 мая того же года по наземным данным отмечалось относительное снижение ЭР до  $-20\%$ , в то время как в спутниковых данных проявилось максимальное за весь летний период относительное увеличение ЭР до  $13\%$ . На таких событиях наиболее ярко проявляются методические отличия в определении приземных уровней ЭР по наземным и спутниковым измерениям, о которых упоминалось выше.

### Выводы

В общем случае отмечается высокая корреляция между результатами наземных и спутниковых измерений ЭР на длинных интервалах – месяцы, год. Тем не менее существуют временные интервалы, когда в отдельные дни корреляция регистрируемых значений ЭР нарушается. Это может быть связано с методическими различиями в определении приземных уровней ЭР при наземных и спутниковых измерениях, а также с различным влиянием атмосферных параметров на прямую и суммарную ЭР.

Прямая эритемная радиация более изменчива, чем суммарная.

Асимметрия сезонного хода в большей степени выражена в прямой, чем в суммарной ЭР. Это связано с большей изменчивостью прямой УФР по сравнению с суммарной. В суммарной ЭР удается обнаружить асимметрию сезонного хода, вызванную асимметрией сезонного хода ОСО при анализе дней наблюдений только с ясной погодой.

Коэффициенты вариации ЭР по наземным и спутниковым данным, в целом, изменяются подобным образом с четким минимумом в июне. Отличие от сезонного хода коэффициентов вариации ОСО указывает на то, что, по-видимому, в вариациях приземной ЭР главную роль играют не столько изменения ОСО, сколько вариации синоптической обстановки.

Кратковременные увеличения ЭР по наземным и спутниковым измерениям не всегда совпадают. Это также может быть связано с различиями в методиках определения приземных уровней ЭР по результатам наземных и спутниковых измерений и разным характером поведения прямой и суммарной ЭР при вариациях облачности и аэрозольного состава атмосферы.

Таким образом, можно подвести итог: наземные данные не могут конкурировать со спутниковыми по охвату исследуемых областей, но они могут обладать большим, чем у спутниковых приборов, пространственным и временным разрешением и позволяют измерять прямую радиацию, прошедшую через атмосферу. Полученные выводы во многом согласуются с результатами работы [14], в которой сравнивались результаты эритемной УФ-радиации по спутниковым и наземным данным в средних широтах.

Работа выполнена при поддержке программы «Ведущие научные школы РФ», грант № 00-15-98509. Двое из авторов пользовались поддержкой INTAS (грант № 00-189).

1. Крученицкий Г.М., Кадырова Т.В., Иванова Н.С., Звягинцев М.А. Общее содержание озона над Россией и прилегающими территориями в 1997 г. // Метеорол. и гидрол. 1998. № 2. С. 119–122.
2. Lubin D., Frederick J.E. Column ozone measurement from Palmer Station, Antarctica: Variations during the austral springs of 1988 and 1989 // J. Geophys. Res. D. 1990. V. 95. N 9. P. 13883–13889.

3. Roy C.R., Gies H.P., Elliot G. Ozone depletion // Nature. (Gr. Brit.). 1990. V. 347. N 6253. P. 235–236.
4. Mikhalev A.V., Chernigovskaya M.A., Shalin A.Yu., Kazimirovsky E.S. Surface ultraviolet radiation over East Siberia. Seasonal variations // Ann. Geophys. 2002. V. 20. N 4. P. 559–564.
5. Mikhalev A.V., Chernigovskaya M.A., Shalin A.Yu., Kazimirovsky E.S. Variations of the ground-level ultraviolet radiation in East Siberia // Adv. Space Res. 2001. V. 27. N 6–7. P. 1109–1114.
6. Шалин А.Ю., Михалев А.В. Выделение прямой ультрафиолетовой радиации при измерениях спектрофотометром с широкой входной апертурой // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 399–402.
7. McKinlay A., Diffey B. A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin // J. of CIE. 1987. N 6. P. 17–22.
8. Herman J.R., Bhartia P.K., Ziemke J., Ahmad Z., Larko D. UV-B increases (1979–1992) from decreases in total ozone // Geophys. Res. Lett. 1996. V. 23. N 11. P. 2117–2120.
9. 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.
10. 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.
11. Михалев А.В., Черниговская М.А., Шалин А.Ю., Белецкий А.Б. Спектральные измерения ультрафиолетовой радиации в Восточной Сибири в период аномалии общего содержания озона // Метеорол. и гидрол. 2000. № 3. С. 29–35.
12. Казимировский Э.С., Матафонов Г.К., Вергасова Г.В., Белинская А.Ю. Тренды и низкочастотные вариации в общем содержании озона над Восточной Сибирью // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. 1999. Вып. 109. Ч. 2. С. 190–199.
13. Швер Ц.А., Форманчук Н.П. Климат Иркутска. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 247 с.
14. McKenzie R.L., Seckmeyer G., Bais A.F., Kerr J.B., Madronich S. Satellite retrievals of erythemal UV dose compared with ground-based measurements at northern and southern midlatitudes // J. Geophys. Res. D. 2001. V. 106. № 20. P. 24051–24062.

**A.V. Mikhalev, M.A. Tashchilin, M.A. Chernigovskaya, and A.Yu. Shalin. Erythemal ultraviolet radiation as deduced from data of ground-based and satellite measurements.**

A comparative analysis of midday values of direct erythemal radiation (ER) from ground-based measurements at Irkutsk and values of total ER from satellite data for the period 1999–2001 is carried out. A correlation analysis is made of the ground-based and satellite data for some months and years, and for the input data for the entire three-year period. In the analysis of the day-to-day variations, we identified periods with a high degree of correlation (0.84–0.99) between ground-based and satellite data, as well as periods with disturbances in the consistency of the variations. We discuss possible reasons of the features identified and the differences observed in the ER variations of ground-based measurements and satellite data. In the ground-based measurements, we identified an asymmetry of the seasonal ER behaviour with respect to the summer solstice, consisting in increase of ER-values in the second half-year as compared with the first half-year for the same angular elevations of the Sun. This feature is more poorly pronounced in the satellite data and is distinguished when only days with clear weather are taken into account. A pronounced seasonal behaviour of the ER variation coefficients with minimum in June is pointed out.