

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.521.3:535.36

А.В. Белявский, В.М. Захаров, Г.М. Крученицкий

ВЛИЯНИЕ ОБЛАЧНОСТИ НА ОБНАРУЖИМОСТЬ ТРЕНДОВ УФ-В ОБЛУЧЕННОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ УМЕНЬШЕНИЕМ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

На основе анализа ряда синхронных измерений общего содержания озона и УФ-В облученности сделаны оценки обнаружимости трендов УФ-В облученности и их значимости для биологических систем.

Возрастающая на протяжении последнего десятилетия озабоченность специалистов и широкой общественности истощением озонового слоя главным образом основывается на соображениях, подобных следующему: «Разрушение озона будет вести к росту ультрафиолетового излучения, что в свою очередь приведет к росту инфекционных заболеваний и рака кожи» [1]. Там же говорится и об угрозе уменьшения продуктивности сельскохозяйственных культур, площади лесов, нарушенных цепей питания в море и других неблагоприятных воздействий на биологические системы возрастания УФ облученности, обусловленного отрицательным трендом общего содержания озона (ОСО).

Оставляя в стороне вопрос о надежности определения этого тренда (при анализе случайного процесса по реализации ограниченной протяженности всегда есть опасность обнаружить ложный тренд, обусловленный низкочастотными гармониками в энергетическом спектре), сосредоточимся на вопросе об относительном вкладе уменьшения общего содержания озона в увеличение УФ облученности. Следует сразу оговориться, что уровень УФ облученности зависит не только от ОСО, но и от вертикального распределения озона (ВРО). Действительно, ввиду роста молекулярного рассеяния с уменьшением высоты вклад озона, находящегося на малых высотах, в ослабление УФ радиации возрастает из-за увеличения длины пути, проходимого рассеянным излучением в нижних слоях атмосферы. Этот эффект становится все более существенным с ростом частоты излучения, т. к. при этом резко возрастает как сечение молекулярного рассеяния ($\sim \lambda^{-4}$, λ — длина волны), так и сечение поглощения озоном. Однако ввиду отсутствия статистически значимой информации о трендах ВРО в настоящее время приходится игнорировать изменения в его профилях и ограничиваться учетом трендов ОСО [2].

Применительно к проблеме тренда УФ облученности ситуация, описанная в докладе ВМО [2], который по замыслу его авторов должен отразить точку зрения международной научной общественности, сводится к следующему:

1. Имеются предсказания трендов спектральной плотности УФ облученности для ясных дней, подсчитанные на основании модели переноса излучения [3] и использующие данные о трендах озона, представленные *Ozone Trends Panel* (4) (ОТР).

2. Имеются результаты трендового анализа [5] данных измерений УФ облученности (проинтегрированных за год) в диапазоне 295–340 нм, выполненных в 1974–1985 гг. на 8-ми актинометрических станциях, расположенных в США между 30,4 и 46,8° с. ш. Эти результаты однозначно указывают на отсутствие положительного тренда, а на 5-ти станциях показывают отрицательный тренд (со статистической зависимостью на уровне 2σ).

3. Интегрирование трендов (п. 1) по полосе прибора (п. 2), выполненное авторами работы [6], показало, что положительные тренды в измерениях УФ облученности в полосе широт 40–52° с. ш. должны варьироваться в пределах от 1,5–1,6% (июль) до 4,7–4,8% (март), что соответствует отрицательным трендам озона 2,2 и 5,6%, вычисленным ОТР.

4. Отсутствие согласия между предсказанными трендами УФ облученности и анализом данных УФ метрической сети США относят за счет отсутствия долговременной стабильности приборов Робертсона — Бергера, которыми оснащена сеть.

В настоящей статье предпринята попытка взглянуть на проблему взаимосвязи трендов ОСО и УФ облученности с другой точки зрения, а именно: оценить обнаружимость и значимость изменений УФ облученности, обусловленных уменьшением ОСО, на фоне их естественной изменчивости, связанной с вариациями облачности. Важность этого фактора подчеркивается всеми исследователями, но непосредственный его учет в уравнении переноса связан с рядом аналитических и методических трудностей, поэтому на сегодняшний день, при учете облачности, обычно ограничиваются [2] приближением линейного по балльности экранирования [7, 8].

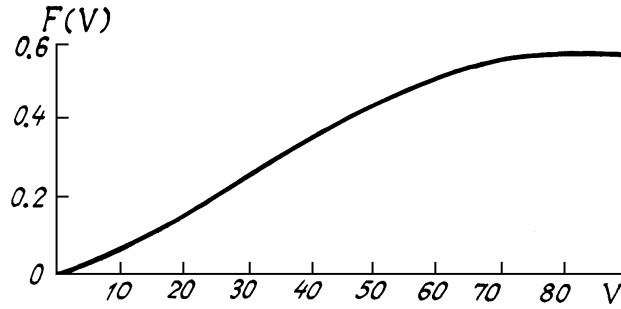


Рис. 1. Зависимость поправочного множителя F в модифицированном законе Бугера от угла Солнца над горизонтом

В качестве исходных данных для нашего анализа были привлечены результаты одновременных измерений ОСО, УФ облученности и балльности облачности, которые регулярно приводятся в УкрНИГМИ (г. Киев) с июля 1990 г. в режиме сетевой озонметрической станции. В качестве озонметра используется прибор М-124, в качестве УФ-метра — модификация того же прибора, выполненная в ГГО и позволяющая проводить интегральные измерения в УФ-А (315–400 нм) и УФ-В (до 315 нм) диапазонах, а балльность облачности определяется визуально.

На первом этапе работы была исследована достоверность исходных данных. Анализ полугодичного ряда (07. 1990–01. 1991) наблюдений был выполнен на основе приближения Шустера для уравнения переноса [9], которое позволяет представить спектральную плотность суммарной радиации в виде

$$Q_\lambda = F(V) I_{0\lambda} e^{-\alpha_\lambda \frac{X}{\sin V}}, \quad (1)$$

где $I_{0\lambda}$ — спектральная плотность солнечной постоянной; X — общее содержание озона; α_λ — спектральный коэффициент поглощения; V — угол Солнца над горизонтом;

$$F(V) = (1 + S)^{-1} \sin V \left\{ e^{\frac{-(\beta+\delta)}{\sin V}} + \left[\frac{\beta\eta + \delta\xi}{\beta + \delta} + \left(1 + \frac{\beta\bar{\eta} - \delta\bar{\xi}}{\beta + \delta} \right) \sin V \right] \left(1 - e^{\frac{-(\beta+\delta)}{\sin V}} \right) \right\}; S = [\beta(1 - \bar{\eta}) + \delta(1 - \xi)](1 - R),$$

R — альbedo; β — молекулярный коэффициент рассеяния; δ — аэрозольный коэффициент рассеяния; η — часть радиации, рассеиваемая молекулами воздуха при прохождении прямого луча в направления земной поверхности; $\bar{\eta}$ — часть радиации, рассеиваемая молекулами воздуха вниз из верхнего полупространства; ξ и $\bar{\xi}$ — то же для аэрозольного рассеяния. В дальнейшем, пренебрегая анизотропией молекул воздуха, полагаем $\eta = \bar{\eta} = 0,5$, а для ξ используем приближение [10] ($\bar{\xi} = 0,742$). Вид функции $F(V)$ для $\lambda = 307$ нм приведен на рис. 1. Спектральной зависимостью F можно также пренебречь: она варьируется для достигающей поверхности части УФ-В диапазона лишь на несколько процентов.

Для суммарной радиации УФ-В диапазона на основании интегральной теоремы о среднем можно записать

$$Q = F(V) I_{0\lambda'} e^{-\alpha_{\lambda'} \frac{X}{\sin V}} (\lambda_2 - \lambda_1), \quad (2)$$

где $\lambda_2 = 315$ нм, λ_1 — наименьшая длина волны излучения, достигающего поверхности; $\lambda' \in [\lambda_1, \lambda_2]$, или

$$Q = F(V) A e^{-\alpha \frac{X}{\sin V}}. \quad (2a)$$

Соотношение (2 а) предполагает линейную зависимость $\ln[Q/F(V)]$ и $X/\sin V$. На рис. 2, а приведены соответствующие экспериментальные данные для безоблачного неба и прямая, проведенная по ним методом наименьших квадратов. Для проверки надежности исходных экспериментальных данных можно воспользоваться следующими соображениями. По $\alpha_{\lambda'}$ (тангенс угла наклона прямой) легко восстановить λ' , а следовательно, и $I_{0\lambda'}$. Далее, из энергетических соображений ясно, что должно выполняться соотношение:

$$\int_{\lambda_2 - \frac{A}{I_{0\lambda}}}^{\lambda_2} I_{0\lambda} d\lambda = A. \quad (3)$$

Проверка (3) для различных диапазонов озонных толщ показала, что оно выполняется с относительной погрешностью ~5%. Для сравнения на рис. 2, б приведены результаты линейной интерполяции чисто бугеровской зависимости:

$$Q = B \exp\left(-\beta \frac{X}{\sin V}\right) \quad (4)$$

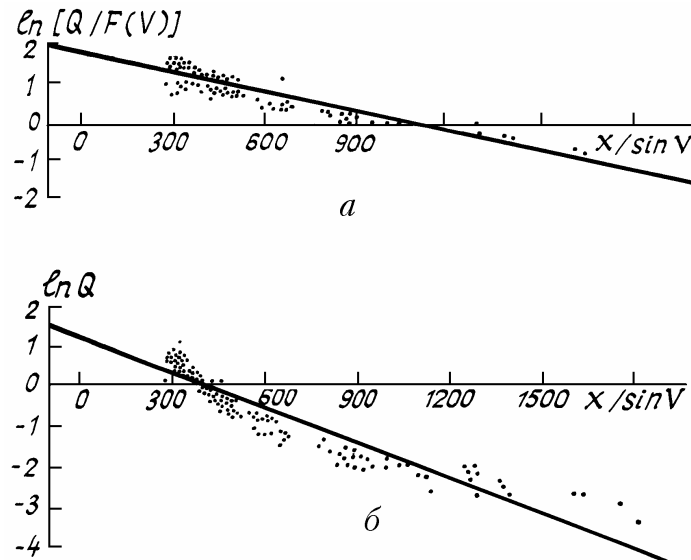


Рис. 2. Зависимость УФ-В облученности при безоблачном небе от озонной толщи и ее аппроксимация соотношениями (2а)–а и (4)–б

Коэффициенты корреляции оказываются равными для случаев (2а) и (4) – $R = 0,94$, относительный разброс экспериментальных точек возрастает вдвое (соответственно 17,1 и 33,3%), а точка λ' для приближения (4) оказывается левее λ_1 , т.е. о выполнении соотношения (3) не может быть и речи. Соотношение (4) было использовано для проверки качества представления массива экспериментальных точек соотношением (2 а). Если заменить экспериментальные точки точками, удовлетворяющими соотношению (2 а), и этот массив аппроксимировать соотношением (4), то значения B и β совпадают с полученными ранее с относительной погрешностью ~ 1%. Аппроксимация экспериментальных для безоблачного неба данных по УФ-А излучению с помощью соотношения (2 а) позволяет непосредственно определить значение солнечной постоянной для диапазона (315–400 нм). Это значение оказывается равным $79,5 \text{ Вт/м}^2$, что хорошо согласуется с данными прямых измерений – $80,5 \text{ Вт/м}^2$ [11]. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что полученные экспериментальные данные можно использовать для установления осредненных зависимостей, а осредненная зависимость (2 а) адекватно отображает массив экспериментальных данных для безоблачной атмосферы.

Таблица 1

Параметры аппроксимации экспериментальных данных соотношением (2а) для различных балльностей

Балльность облачности	Относительная частота повторяемости	Коэффициент корреляции	A , (Вт/м ²)	$10^2 \cdot a$, (км ⁻¹)
0	0,26	–0,94	6,26	0,151
1–2	0,067	–0,979	5,55	0,137
3–4	0,087	–0,979	6,04	0,143
5–6	0,078	–0,962	5,93	0,144
7–8	0,11	–0,908	4,72	0,131
9–10	0,398	–0,657	2,95	0,137

Остальные экспериментальные данные были аппроксимированы соотношением (2 а) для различных балльностей облачности с шагом 2 балла. Результаты аппроксимации сведены в табл. 1 и проиллюстрированы рис. 3, а–3, д.

Необходимо отметить, что т.к. множитель $F(V)$ учитывает только молекулярное и аэрозольное рассеяния, интерполяция соотношением (2 а) зависимости суммарной УФ радиации от озонной толщи в условиях облачности заведомо преувеличивает эту зависимость (так же как соотношение (4) для безоблачной атмосферы). И тем не менее прямой численный эксперимент, повторяющий условия натурных измерений по балльности и углам Солнца и варьирующий ОСО, выполненный на основе соотношения (2 а), показывает, что каждому проценту уменьшения общего озона соответствует всего 0,84% увеличения суммарной УФ-В радиации, а не 1,6÷1,9%, как получается при интегрировании результатов работы [3] по спектру $\lambda \leq 315$ нм. (Любопытно отметить, что 1,6% прироста УФ-В радиации получаются при использовании в численном эксперименте соотношения (4). По-видимому, это различие объясняется тем, что авторы работы [3] выполняли свои расчеты только для местного полдня и ясного неба, но возможно и другое объяснение.

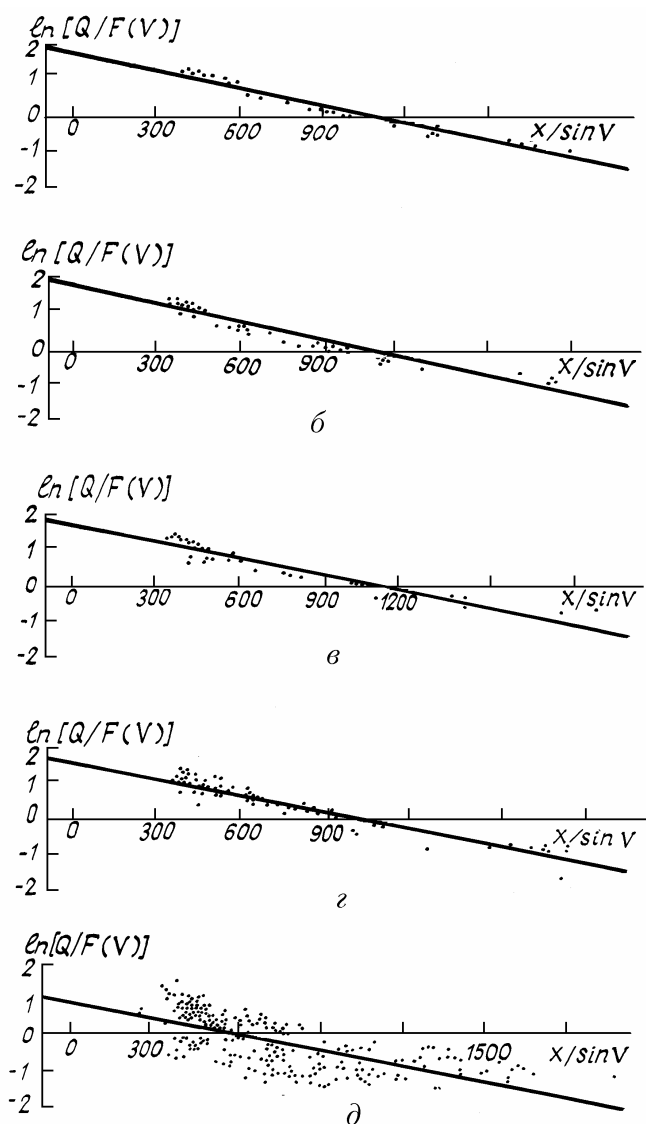


Рис. 3. Аппроксимация зависимости (2а) для различных балльностей облачности: 1–2 балла – а, 3–4 балла – б, 5–6 баллов – в, 7–8 баллов – г, 9–10 баллов – д

Дело в том, что современные алгоритмы решения уравнения переноса излучения требуют гораздо более подробной информации о свойствах аэрозоля, чем та, которой мы на сегодняшний день располагаем. Неизбежная при этом неадекватность учета реальных условий распространения излучения может привести к принципиальным расхождениям с наблюдаемыми в эксперименте значениями облученности. В этом смысле простой алгоритм Чандрасекара – Шустера [9] представляется более предпочтительным в смысле устойчивости, т.к. использует лишь осредненные по полусферам и всей толще атмосферы характеристики рассеивателей.

Для получения истинного отношения между трендами ОСО и суммарной УФ-В радиации (k), полученное значение 0,84 следует умножить на средневзвешенное по всем балльностям значение коэффициента корреляции $\bar{R} = 0,83$, что в итоге дает $k = 0,7$. Необходимость такой операции связана с тем обстоятельством, что использованное в численном эксперименте соотношение (2 а) не описывает реальную зависимость Q от X точно, т.е. существует не учитываемый этим соотношением разброс, обусловленный вариациями других радиационных факторов.

Таблица 2

Эмпирические переходные вероятности между различными балльностями облачности; в скобках — соответствующие средние приращения ОСО

0	0	1—2	3—4	5—6	7—8	9—10
0	0,908 (0)	0,036 (2)	0,015 (—10)	0,01 (—24)	0,005 (27)	0,026 (—31)
1—2	0,077 (—2)	0,481 (0)	0,212 (—12)	0,096 (—26)	0,058 (—29)	0,077 (—33)
3—4	0,029 (10)	0,13 (12)	0,464 (0)	0,188 (—14)	0,116 (—17)	0,072 (—21)
5—6	0 (0)	0,067 (26)	0,2 (14)	0,35 (0)	0,217 (—3)	0,167 (—7)
7—8	0,048 (27)	0,036 (29)	0,072 (17)	0,108 (3)	0,41 (0)	0,325 (—4)
9—10	0,026 (31)	0,013 (33)	0,016 (21)	0,032 (7)	0,078 (4)	0,835 (0)

Далее был проведен анализ значимости и обнаружимости трендов суммарной УФ-В радиации (Q) на фоне ее естественной изменчивости, обусловленной вариациями облачности. Для этой цели по всему ряду проведенных измерений были подсчитаны относительные частоты (эмпирические вероятности переходов между различными значениями балльности облачности. (Балльность определялась с дискретностью в 2 балла. Для каждого из переходов были затем определены средние значения приращения ОСО. (табл. 2). После этого был поставлен рандомизированный численный эксперимент, в ходе которого определялась УФ-В облученность за период наблюдений при различных сценариях развития облачности. Всего было разыграно 72 сценария, каждый из которых формировался следующим образом. В соответствии с эмпирическими вероятностями смены балльности с помощью датчика случайных чисел определялась балльность облачности при каждом последующем измерении по балльности предыдущего. (В качестве первого измерения использовалось первое измерение реального ряда наблюдений). Значения ОСО при каждом следующем измерении получались прибавлением к значению ОСО при предыдущем среднего значения приращения ОСО, соответствующего выпавшей смене балльности. УФ-В облученность при каждом «игровом» измерении определялась по формуле (2 а) с использованием значений A и α , соответствующих получившейся балльности облачности (табл. 1) и значения V , имевшего место в реальном ряду наблюдений. Затем по каждому из сценариев вычислялись средние значения ОСО и УФ-В облученности, а в полученном ряду из 72 членов относительные стандартные отклонения каждой из этих величин. Эксперимент показал, что при практически полном отсутствии изменений ОСО (относительные вариации общего озона составили в среднем по эксперименту $(0,51 \pm 0,56) \cdot 10^{-2}\%$ и ни в одной реализации не превышали 0,016%) относительное стандартное отклонение Q составило $\sigma_0 = 4,33\%$. В таких условиях естественной изменчивости среднеквадратическое отклонение выборочного среднего за n лет от истинного значения составит $\frac{\sigma_0}{\sqrt{n-1}}$. Если при этом ОСО

уменьшается на $r\%$ в год, то относительный средний прирост Q за тот же период составит $\frac{krn}{2}$. При этом условии обнаружимости тренда с доверительной вероятностью 0,95 можно записать в виде

$$\frac{2\sigma_0}{\sqrt{n-1}} \leq \frac{krn}{2} \quad (5)$$

или

$$n^3 - n^2 \geq \frac{16\sigma_0^2}{k^2 r^2} \quad (5a)$$

Из соотношения (5 а) ясно, почему попытка обнаружить тренд суммарной УФ-В радиации, предпринятая в [5], не могла принести успеха. Даже для $r = 0,5\%$ в год (наибольший из трендов, приведенных в [4], соответствующий только январю в широтном поясе 53—64°N) формула (5 а) дает $n \geq 14$ лет, а авторы [5] анализировали 12-летний период (1974—1985 гг.). Если же воспользоваться среднегодовыми значениями трендов для широтной зоны, в которой расположена сеть приборов Робертсо-

на—Бергера, т. е. положить $r = 0,13\%$ в год, то из (5 а) следует 33 лет. Разумеется, статистика облачности и ее рассеивающие свойства для мест расположения станций УФ-метрической сети США могут отличаться от таковых в Киеве, но нет никаких оснований полагать, что это смягчит приведенные выше оценки. Кроме того, для УФ-метров Робертсона—Бергера, имеющих полосу регистрации излучения до 340 нм, величина k должна оказаться не на уровне 0,7—0,8, как указано в [2], а существенно ниже, что скажется на сроках обнаружения трендов в сторону их увеличения ($k = 0,7$ для УФ-метра на базе М-124 с полосой регистрации, ограниченной 315 нм). И наконец, напомним, что приведенные оценки получены из численного эксперимента, основанного на соотношении (2 а), которое заведомо преувеличивает влияние озонной толщи на суммарную УФ-В радиацию при наличии облачности.

Относительно значимости трендов суммарной УФ-В радиации применительно к биологическим системам заметим, что, оценивая время, за которое скажется многолетний эффект переоблученности, коэффициент 16 в правой части формулы (5 а) следует, по-видимому, заменить на 64, т. к. флуктуационную устойчивость можно ожидать на уровне не менее 4 σ . Разумеется, сказанное относится только к устойчивости по отношению к суммарной УФ-В радиации, а для аналогичных оценок применительно к облученности на конкретных длинах волн требуется использовать относящиеся к ним значения k и σ_0 , для получения которых необходимы ряды наблюдений, выполненных с помощью спектрального УФ-метра.

Приведенные оценки времени обнаружения трендов и проявления их воздействия на биологические системы являются минимальными, т. к. связаны лишь с демпфирующим влиянием изменчивости облачности. При более адекватном учете всех факторов в правую часть формулы (5 а) к σ_0^2 необходимо добавить следующие члены: σ_1^2 — дисперсия облученности, обусловленная межгодовыми вариациями ОСО; σ_2^2 — дисперсия облученности, связанная с вариациями активности Солнца; σ_3^2 — дисперсия облученности, обусловленная изменчивостью аэрозольной обстановки и т. д. Если же обсуждать значимость предполагаемых трендов для биосистемы, то необходимо добавить и дисперсию облученности по ареалу данной биосистемы. Все это позволяет сделать вывод, что прогнозируемые катастрофические последствия истощения озонного слоя, по меньшей мере, не беспорны.

1. Сохранение слоя озона. Совместный проект Конфедерации профсоюзов Швеции, Федерация Шведской промышленности, Совета по планированию и координации научных исследований Швеции, Совета по защите окружающей среды Швеции, Государственных учреждений Швеции по международному развитию, Академии наук Швеции.
2. Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989, WMO. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report № 20. V. 1. 392 p.
3. Frederick J. E. and Lubin D. // J. Geophys. Res. 1989. V. 93. P. 3825—3832.
4. Ozone Trends Panel. Report. 1988.
5. Scotto J., Cotton C., Urbach F., Deryer D., Feurs T. // Science. 1988. V. 239. P. 762—764.
6. Caldwell M. N., Camp L. B., Warner C. W., Flint S. D. Action Spectra and their Key Role in Assessing Biological Consequences of Solar UV-B Radiation Change in Stratospheric Ozone Reduction. Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life/Ed. by R.C. Worrest and M.M. Caldwell. Berlin: Springer-Verlag, 1986. P. 87—111.
7. Мо Т., Green A.-F. C. // Photochem. Photobiol. 1974. V. 20. P. 483—496.
8. Ilyas M. // Atmos. Environ. 1987. V. 21. P. 1483—1484.
9. Белинский В. А., Гараджа М. П., Меженлая Л. М., Незваль Е. И. Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба. М: Изд-во МГУ, 1968. 228 с.
10. Hinzpeter H. // Zs. Meteorol. 1955. № 9. Nr 4; Jbid. 1957. № 11. Nr 1.
11. Поток энергии Солнца и его изменения /Под ред. О. Уайта. М.: Мир, 1980. 558 с.

Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО),
г. Долгопрудный
Украинский региональный научно-исследовательский
гидрометеорологический институт (УкрНИГМИ), Киев

Поступила в редакцию
5 мая 1991 г.

A. V. Belyavskii, V. M. Zakharov, G. M. Kruchenitskii. Influence of Clouds on the Detectability of Trends in the UV-B Irradiance Caused by the Total Ozone Decrease.

Estimations are made of UV-B radiation trends detectability and their importance for biological systems based on simultaneous total ozone and UV-B radiation measurements analysis.