

А.Ю. Шалин

## Особенности спектрального состава приземной УФ-радиации в г. Иркутске

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 29.07.2002 г.

Исследуются особенности спектрального состава УФ-радиации у поверхности Земли. Изучается степень влияния вариаций параметров состояния атмосферы, таких как ОСО, атмосферное давление и содержание аэрозоля, на изменчивость приземной УФ-радиации в области 300–350 нм в Иркутске. Определены наиболее существенные из них в отдельных полосах выбранного диапазона на разных временных масштабах. Построены функции спектральных откликов прямой полуденной УФ-радиации на изменения атмосферных параметров на 1% от их средних значений для Иркутска. Эти функции применимы для оценок влияния реальных изменений состояния атмосферы. Отмечается, что фактором, определяющим общий уровень УФ-радиации, являются аэрозольное и облачное состояния. Влияние колебаний давления на изменчивость УФ-радиации несущественно, но в условиях оптически стабильной атмосферы, которые могут сохраняться в течение нескольких суток, влияние вариаций давления на УФ-радиацию может преобладать. За спектральный состав ответственны ОСО и высота Солнца. На длинах волн больше 320 нм обнаружено совпадение спектральной структуры коэффициента вариаций УФ-радиации с системой полос Хаггинса в спектре поглощения озона, а на длинах волн короче 320 нм – с характерными спектральными особенностями внеатмосферного солнечного УФ-спектра. Выяснено, что мелкомасштабная структура приземного спектра определяется структурой внеатмосферного солнечного УФ-спектра, а общий спектральный ход подчиняется, главным образом, крупномасштабному спектральному ходу коэффициента поглощения озона.

Некоторые особенности спектрального состава УФ-радиации у поверхности Земли ранее уже исследовались как с чисто теоретической точки зрения [1], так и с использованием экспериментальных данных [2]. Наша задача – продолжить такого рода исследования с целью выяснения степени влияния различных параметров атмосферы на изменчивость приземной УФ-радиационной области 300–350 нм [3]. Определим наиболее существенные из них в отдельных полосах выбранного диапазона и покажем, чем определяется структура приземного спектра различных спектральных масштабов.

Вариации параметров состояния атмосферы, наиболее значимых в УФ-области спектра, таких как ОСО, атмосферное давление и аэрозоль, оказывают различное и при этом спектрально зависимое влияние на изменчивость приземной УФ-радиации. Величина влияния каждого из них может отличаться для различных регионов планеты, поскольку всегда существуют разнообразные региональные особенности состояния и динамики атмосферы.

В данной статье рассмотрим поведение спектров УФ-радиации в Иркутске (Восточная Сибирь). Определим степень влияния каждого отдельного параметра на УФ-радиацию с помощью формулы Бугера

$$\ln I_{\lambda} = \ln I_{\lambda,0} - \alpha_{\lambda} X \mu - \frac{P}{P_0} \beta_{\lambda} m - \delta_{\lambda} m_1, \quad (1)$$

где  $I_{\lambda}$  – интенсивность приземной прямой солнечной УФ-радиации;  $I_{\lambda,0}$  – интенсивность прямой солнечной УФ-радиации на верхней границе атмосферы;  $\alpha_{\lambda}$  – коэффициент поглощения излучения озоном;  $X$  – общее содержание озона;  $\mu$  – оптическая масса озона в направлении на Солнце;  $\beta_{\lambda}$  – оптическая толщина рэлеевской атмосферы;  $m$  – оптическая масса атмосферы;  $P$  – атмосферное давле-

ние,  $P_0$  – атмосферное давление на уровне моря;  $\delta_{\lambda}$  – оптическая толщина атмосферного аэрозоля или коэффициент аэрозольного ослабления;  $m_1$  – оптическая масса аэрозоля. Будем брать от (1) частные производные по соответствующему параметру. В результате получаются следующие выражения:

при изменении ОСО

$$(\Delta I_{\lambda}/I_{\lambda})_X = -\alpha_{\lambda} \mu \Delta X, \quad (2a)$$

при изменении атмосферного давления

$$(\Delta I_{\lambda}/I_{\lambda})_P = -\frac{\beta_{\lambda} m}{P_0} \Delta P_0, \quad (2б)$$

при аэрозольных вариациях

$$(\Delta I_{\lambda}/I_{\lambda})_b = -m_1 \lambda^{-a} \Delta b, \quad (2в)$$

$$(\Delta I_{\lambda}/I_{\lambda})_a = m_1 b \lambda^{-a} \Delta a, \quad (2г)$$

где обозначение частной производной заменено на  $\Delta$ ; нижние индексы в левой части уравнений – параметры, изменение которых обуславливает вариации приземной прямой УФ-радиации. Влияние аэрозольных вариаций разделено на отклик от вариаций коэффициента мутности  $b$  и на отклик от изменения аэрозольного параметра Ангстрема  $a$  в предположении, что аэрозольная оптическая толщина (АОТ) подчиняется закону Ангстрема  $\delta_{\lambda} = b \lambda^{-a}$  ( $\lambda$  в мкм) [4]. Величина  $b$  приближенно отражает содержание крупных частиц аэрозоля, а параметр  $a$  характеризует величину относительного содержания мелкодисперсной фракции аэрозоля по сравнению с грубодисперсной [5].

Из (2а) и (2б) следует, что влияние колебаний ОСО и давления ( $\Delta X$  и  $\Delta P$ ) на относительные вариации

УФ-радиации ( $\Delta I_\lambda/I_\lambda$ ) зависит от оптической массы: зимой оно максимально, а летом минимально. То есть в выражениях (2а) и (2б) только оптическая масса является переменным параметром, что соответствует изменяющемуся коэффициенту усиления влияния колебаний ОСО и давления на относительные вариации УФ-радиации.

На рис. 1,а приведены спектральные отклики прямой полуденной УФ-радиации 29.05.01 при условии изменения атмосферных параметров на 1% от их средних значений для Иркутска.

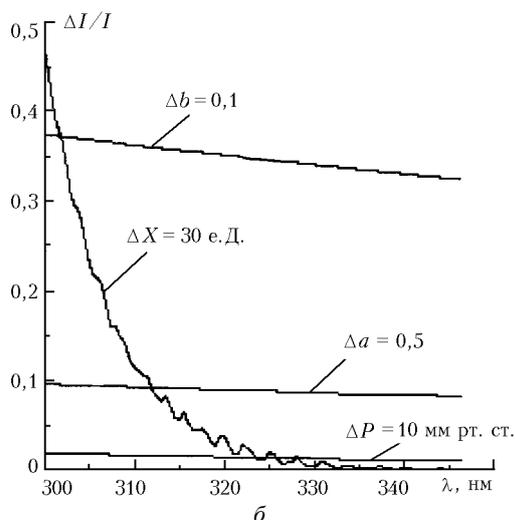
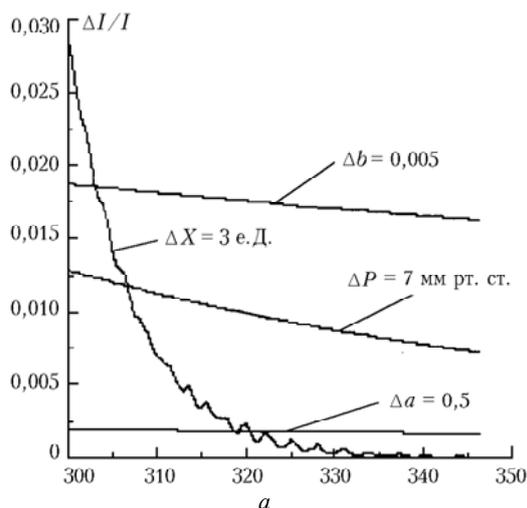


Рис. 1. Относительное изменение прямой УФ-радиации при колебаниях различных параметров состояния атмосферы

Для вариации аэрозоля говорить о процентном изменении и средних значениях его параметров можно только весьма условно, поскольку они очень непостоянны [5, 6].

Приведенные на рис. 1,а графики отражают реакцию УФ-радиации на однопроцентное изменение параметров атмосферы, поэтому их можно назвать весовыми. То же можно сказать о рис. 1,б, но при условии изменения атмосферных параметров на «типичную» в течение года величину от их средних значений для Иркутска.

Наиболее сильное влияние по всему спектру оказывает изменчивость дымки и облачности, что наиболее отчет-

ливо проявляется на годовых вариациях (рис. 1,б). Колебания давления хотя и находятся на втором месте по степени влияния на изменчивость УФ-радиации (см. рис. 1,а), но на годовом масштабе (см. рис. 1,б) такое влияние несущественно. Тем не менее в условиях оптически стабильной атмосферы, которые могут сохраняться в течение нескольких суток, влияние вариаций давления на УФ-радиацию примет преобладающее значение. За изменения формы спектра ответственны колебания произведения ОСО на оптическую массу озона, которое в данном случае можно назвать эффективным содержанием озона. При различных реализациях изменения состояния атмосферы роль вариаций тех или иных параметров может значительно меняться, приводя к различным взаимным комбинациям кривых, приведенных на рис. 1.

Приравняв (2а) и (2б), определим длину волны (при  $m = \mu$ )

$$\lambda_0 = \left( \frac{\Delta P}{\alpha_\lambda P_0 \Delta X} \frac{8\pi^3 H}{3N} (n^2 - 1)^2 \frac{6 + 3p}{6 - 7p} \right)^{1/4},$$

короче которой вклад  $\Delta X$  в относительное изменение УФ-радиации будет больше вклада  $\Delta P$ , а при  $\lambda > \lambda_0$  наоборот. Здесь  $N$  – число молекул в единице объема (число Лошмидта);  $n$  – показатель преломления;  $H$  – высота однородной атмосферы;  $p$  – коэффициент оптической анизотропии молекул. При изменении давления и озона на 1%  $\lambda_0 = 306,5$  нм. При  $\lambda > 325-330$  нм вклад  $\Delta X$  пренебрежимо мал по сравнению с вкладом колебаний других параметров атмосферы.

В формулы (2в) и (2г) помимо вариаций атмосферных параметров входят еще и их абсолютные значения, а поскольку они могут принимать значения в широком диапазоне ( $a$  может меняться в пределах от 0 до 4, а  $b$  от 0,04 до 1 и более [4]), то их влияние может меняться от пренебрежимо малого (особенно влияние  $\Delta a$ ) до преобладающего. Для обозначенного дня аэрозольные параметры составляли  $b = 0,051$ , т.е. практически минимально возможное значение для Иркутска,  $a = 0,973$ , т.е. близкое к среднему значению. Из рис. 1 видно, что влияние изменений ОСО начинает проявляться на длинах волн короче 320 нм с резким увеличением в коротковолновой части. Пожалуй, наиболее существенным является влияние вариаций мутности атмосферы. Вариации этого параметра лежат в весьма широких пределах, однако на форму спектра такие вариации практически не влияют, по крайней мере не вносят каких-либо особенностей. Все то же самое относится и к влиянию колебаний давления, с тем лишь отличием, что оно заметно меньше и относительный диапазон изменений давления тоже меньше.

Величина прямой УФ-радиации в пределах исследуемого диапазона длин волн, определяемой с помощью аппаратуры, используемой в Иркутске, устанавливается с точностью 12–16% в зависимости от длины волны и условий регистрации [3]. В связи с этим достоверно обнаружить влияние изменений атмосферных параметров на относительные вариации УФ-радиации возможно при условии, что это влияние приводит к отклонениям УФ-радиации на величину больше указанной погрешности. Так, например, реакция прямой УФ-радиации на годовое изменение давления в Иркутске по расчетным данным составляет не более 2% (см. рис. 1,б), поэтому проверить ее экспериментально на данной аппаратуре невозможно, в этом случае можно говорить только об

оценках. Реакция же УФ-радиации на изменения других атмосферных параметров вполне обнаружима по экспериментальным данным и совпадает с расчетными оценками с точностью 15–20%.

Для демонстрации селективности влияния различных внешних условий на приход приземного УФ-излучения проделано следующее. Измеренные в течение года наблюдений спектры нормированы на единицу на длине волны 345 нм, усреднены по месяцам и по году. Для нормировки спектров выбрана  $\lambda = 345$  нм, так как на ней минимально влияние как вариаций состояния атмосферы, что отражено на рис. 1, так и самих параметров атмосферы. На рис. 2, а представлены результаты такой операции усреднения. Здесь приведены среднemesячные и среднегодовой нормированные спектры.

Из рис. 2 видно, что высота Солнца определяет коротковолновую границу доходящей до поверхности Земли радиации. Определим  $\lambda_{\min}$  как  $\lambda$ , при которой до поверхности доходит 1% от  $I_{345}$ . Для Иркутска получено, что минимальная  $\lambda_{\min}$  равна 300 нм в июне–июле, максимальная  $\lambda_{\min} = 308$  нм в декабре–январе и среднегодовая  $\lambda_{\min} = 303$  нм.

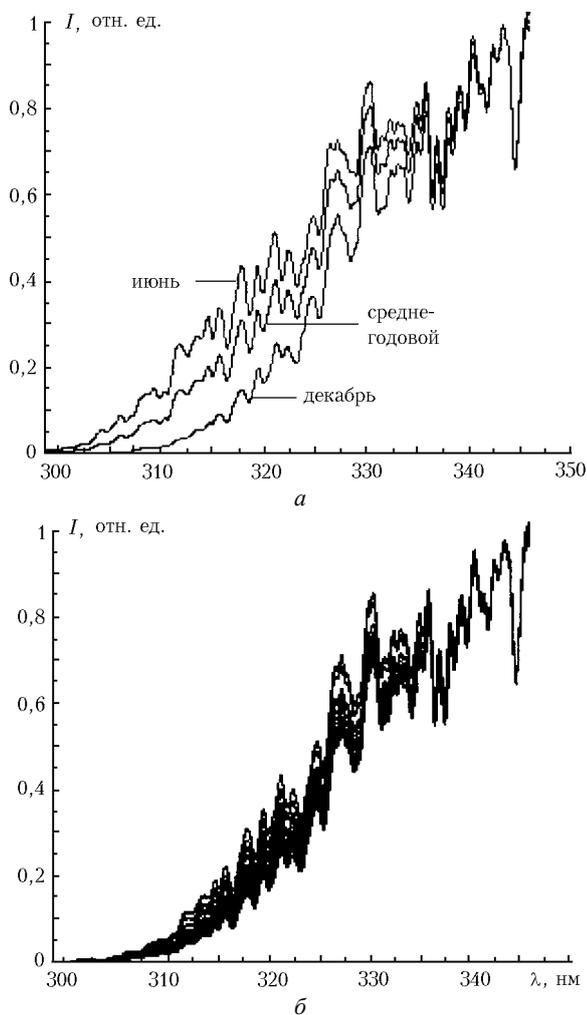


Рис. 2. Нормированные среднemesячные за 2000 г. (а) и ежедневные за февраль 2000 г. (б) спектры

Поведение приземной УФ-радиации, при мало меняющейся высоте Солнца, но при значительных измене-

ниях влияния состояния атмосферы за счет большого оптического пути, показано на рис. 2, б. Изменчивость нормированных ежедневных спектров в течение месяца по сравнению с изменениями в течение года меньше, и ее наибольшая величина смещена к несколько более длинным волнам.

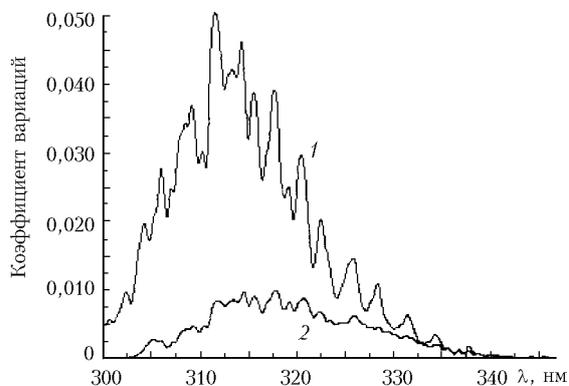


Рис. 3. Коэффициент вариаций прямой приземной УФ-радиации: среднегодовой за 2000 г. (1) и за февраль 2000 г. (2)

Более наглядно спектральные изменения можно отобразить, построив годовой и месячный графики коэффициентов вариаций (рис. 3). Эти коэффициенты определяются как отношение дисперсии к среднему значению радиации на данной длине волны.

Согласно этим графикам есть область длин волн, на которых УФ-радиация изменяется наиболее сильно в зависимости от условий регистрации.

На годовом временном масштабе наибольшие относительные изменения претерпевает область 305–323 нм и максимальные вариации испытывает радиация с  $\lambda = 312$  нм, а на месячном масштабе – область 310–330 нм с максимумом на  $\lambda = 318$  нм. Различие в характере распределения по спектру связано с влиянием изменения высоты Солнца в течение года.

Существенное превышение коэффициентов годовых вариаций над месячными вполне естественно, так как диапазон изменения всех параметров за год значительно шире, чем за месяц. На годовой кривой проявляется особенность, связанная с различным характером поглощения озоном. В УФ-области спектра имеются две полосы поглощения озона: полоса Хартли (180–340 нм) и система полос Хаггинса (320–366 нм). Полоса Хартли состоит из небольших расплывчатых пиков на строго непрерывном фоне, центр полосы совпадает с длиной волны 255 нм. На длинноволновом конце этой полосы накладывается система полос Хаггинса. Они значительно слабее полосы Хартли, но максимумы ее выражены резче [7]. При  $\lambda > 320$  нм локальные экстремумы на кривой  $I$  совпадают с экстремумами поглощения озона, находящимися в системе полос Хаггинса, и именно резким уменьшением поглощения озона на этом участке спектра определяется спад коэффициента вариаций. При  $\lambda < 320$  нм локальные экстремумы на обеих кривых совпадают с положением пиков во внеатмосферном солнечном спектре и в некоторой степени повторяют его форму. Коротковолновый спад коэффициентов вариаций обусловлен чрезвычайно высокой степенью поглощения радиации этого диапазона озоном, в связи с чем количество озона, которое будет поглощать эту радиацию, уже не так существенно, как в более «мягком» ультрафиолете.

Именно поэтому кривая 2, отражающая степень изменчивости УФ-радиации в феврале при значительных оптических массах, опускается до нуля при  $\lambda < 308$  нм.

Выясним, чем определяется именно такой спектральный ход приземной УФ-радиации, который показан на рис. 2. Для этого на рис. 4 отложим все слагаемые, входящие в формулу (1): логарифм среднегодового приземного УФ-спектра, логарифм внеатмосферного солнечного УФ-спектра с таким же спектральным разрешением 0,2 нм [8], показатель поглощения озоном при среднегодовом ОСО 354 е.Д. и  $\mu = 2$  (соответствует высоте Солнца  $37^\circ$ ) [9], показатель поглощения рэлеевской атмосферой при среднем давлении 723 мм рт. ст. [7] и показатель поглощения аэрозолем при  $b = 0,1$  (средняя и хорошая прозрачность) и  $a = 1$ .

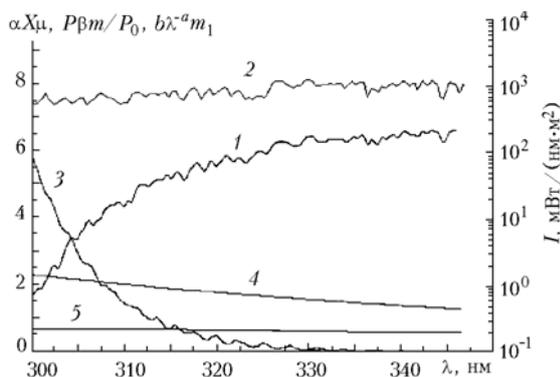


Рис. 4. Влияние внеатмосферного УФ-спектра (2), поглощения озоном (3), рассеяния рэлеевской атмосферой (4) и рассеяния аэрозолем (5) на форму спектра приземной УФ-радиации (1)

Отчетливо прослеживается, что мелкомасштабная по спектру форма приземной радиации определяется соответствующими линиями внеатмосферного солнечного спектра. Основной спектральный ход подчиняется сильному влиянию поглощения озоном. Рэлеевское рассеяние вносит небольшое, слабо меняющееся, без особенностей по спектру влияние. Аэрозоль, в рамках используемой модели, на форму спектра практически не влияет, однако это еще подлежит более детальному изучению, так как этот атмосферный компонент весьма изменчив по общему содержанию, распределению спектра размеров частиц, химическому составу и по пространственному распределению. В силу таких его свойств аэрозоль вполне может оказывать существенное влияние, особенно в промышленно развитых областях, к которым относится и Иркутск.

#### *A. Yu. Shalin. Peculiarities of spectral composition of ground-level UV radiation at Irkutsk.*

The peculiarities of the spectral composition of UV radiation at the ground are investigated. The degree of influence of the variation of atmospheric condition parameters, such as TOC, atmospheric pressure and aerosol, on the variability of the ground-level UV radiation in the region 300–350 nm is studied at Irkutsk. The most significant of them were determined in separate bands of the selected range at different time scales. Functions of spectral responses of direct midday UVR to variations of the atmospheric parameters by 1% of their mean values for Irkutsk were constructed. The functions can be used to assess the influence of actual changes under atmospheric conditions. It is pointed out that the aerosol and cloud state is the factor that determines the overall UVR level. The effect of pressure fluctuations on UVR variability is insignificant; however, under conditions of optical stability of the atmosphere which can persist for several days, the influence of pressure variations on UVR can become predominant. TOC and the Sun's altitude are responsible for the spectral composition. For wavelengths longer than 320 nm, it was found that the spectral structure of the UVR variation coefficient coincides with the system of Huggins bands in the ozone absorption spectrum, and for wavelengths shorter than 320 nm, it coincides with typical spectral patterns of the extra-atmospheric solar UV spectrum. It was ascertained that the small-scale structure of the ground-level spectrum is determined by the structure of the extra-atmospheric solar UV spectrum, while the overall spectral variation is determined mainly by the large-scale spectral behaviour of the ozone absorption coefficient.

*Результаты.* Установлена степень влияния вариаций параметров состояния атмосферы (ОСО, атмосферное давление и аэрозоль) на изменчивость приземной УФ-радиации области 300–350 нм в Иркутске. Определены наиболее существенные из них в отдельных полосах выбранного диапазона. Установлены пределы изменения длины волны коротковолновой границы приземной УФ-радиации в течение года. Обнаружено совпадение спектральной структуры коэффициента вариаций УФ-радиации с системой полос Хаггинса в спектре поглощения озона при  $\lambda > 320$  нм, а при  $\lambda < 320$  нм – с характерными спектральными особенностями внеатмосферного солнечного УФ-спектра. Выяснено, чем определяется структура приземного спектра различных спектральных масштабов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ – грант ведущих научных школ Российской Федерации № 00-15-98509 и INTAS (грант № 00-189).

1. Банах Г.Ф., Инполитов И.П., Лопасова Т.А. Влияние атмосферы на коротковолновую границу солнечной УФ-радиации у поверхности Земли // Косм. исслед. 1986. Т. 24. Вып. 6. С. 890–895.
2. Бурлов-Васильев К.А., Васильева И.Э. Спектральная прозрачность земной атмосферы в области ближнего ультрафиолета // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1992. Т. 28. № 12. С. 1170–1175.
3. Шалин А.Ю., Михалев А.В. Выделение прямой ультрафиолетовой радиации при измерениях спектрофотометром с широкой входной апертурой // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 399–402.
4. Белинский В.А., Гараджа М.П., Меженная Л.М., Незваль Е.И. Ультрафиолетовая радиация Солнца и неба. М.: Изд-во МГУ, 1968. 228 с.
5. Кабанов Д.М., Сакерин С.М. О изменчивости параметров формулы Ангстрема для аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Томска // Аэрозоли Сибири: Тезисы докл. Томск, 1999. С. 55.
6. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Еремина Т.А., Рассказчикова Т.М., Турчинович С.А. О маломасштабной пространственной изменчивости прозрачности атмосферы и солнечной радиации // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 10. С. 1049–1054.
7. Гуцин Г.П. Исследование атмосферного озона. Л.: Гидрометеоздат, 1963. 269 с.
8. Arvesen J.C., Griffin R.N., Pearson B.D. Determination of Extraterrestrial Solar Spectral Irradiance from a Research Aircraft // Appl. Opt. 1969. V. 8. N 11. P. 2215–2232.
9. Molina L.T., Molina M.J. Absolute absorption cross sections of ozone in the 185 to 350 nm wavelength range // J. Geophys. Res. D. 1986. V. 91. N 13. P. 14501–14508.