

## Вариации ультрафиолетовой *B*-радиации в Томске в 2003–2007 гг.

Борис Денисович Белан<sup>1,2</sup>, Георгий Алексеевич Ивлев<sup>1</sup>,  
Татьяна Константиновна Складнева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы СО РАН, лаборатория оптической погоды  
634055, г. Томск, пл. акад. Зюева, 1  
bbd@iao.ru; ivlev@iao.ru; tatyana@iao.ru

<sup>2</sup>Томский государственный университет, кафедра метеорологии и климатологии  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 6.02.2008 г.

Представлены результаты мониторинга ультрафиолетовой *B*-радиации, проводимого с помощью ультрафиолетового пиранометра UVB-1 и спектрофотометра Brewer MKIV № 049 на TOR-станции ИОА СО РАН г. Томска в 2003–2007 гг. Показано, что основной вклад в годовой приход УФ–*B*-радиации вносит теплый период с максимумом в июне. В среднегодовом ходе УФ–*B*-радиации наблюдаются весеннее повышение суточного прихода в апреле с последующим спадом к началу мая, а также колебания суточного поступления с периодом 10–15 дней с характерными пиками (летний период). Отмечено, что в спектральном ходе наибольшая изменчивость наблюдается в диапазоне 295–310 нм (полосе Хаггинса), которая варьирует от года к году.

*Ключевые слова:* атмосфера, ультрафиолетовая радиация, общее содержание озона, количество облачности.

### Введение

Ультрафиолетовая радиация (УФР) играет важную роль во многих фотохимических и химико-биологических процессах, происходящих в атмосфере Земли и на ее поверхности, участвует в формировании климата, влияет на биосферу планеты. Уровень и вариации приземной ультрафиолетовой радиации определяются как астрономическим фактором (зенитным углом Солнца), так и рядом других факторов. К ним относятся: изменение общего содержания озона, наличие облачности, альbedo подстилающей поверхности, аэрозольная оптическая толщина, различные примеси воздуха, имеющие линии поглощения в ультрафиолетовой области. Вклад каждого из этих факторов переменный и зависит от физико-географических и климатических особенностей региона. Существующая в настоящее время в России сеть наземного мониторинга УФ-радиации [1] и спутниковые измерения [2–5] не позволяют контролировать ее изменения на региональном уровне.

При этом имеются многочисленные свидетельства региональных особенностей в приходе УФ–*B*-радиации [6–8]. Авторы работы [9] на основе данных измерений приземной эритемной ультрафиолетовой радиации (ЭУФР) вблизи пяти крупных городов Сибирского региона (Новосибирск, Томск, Горно-Алтайск, Красноярск, Иркутск) показали, что существует пространственная мезомасштабная неод-

нородность в распределении УФ-радиации, которая формируется под влиянием атмосферных факторов (облачный режим, аэрозоль, общее содержание озона), а также циркуляционных процессов и физико-географических особенностей региона. Они отмечают, что для рассматриваемых регионов средние относительные вариации УФ-радиации достигают  $\pm 15$ –20%.

В то же время из ряда работ (данные наземных измерений) [10–12] следует, что изменения УФР, связанные с региональными особенностями, могут быть значительными. Так, в работах [13, 14] отмечены некоторые особенности вариации УФР в регионе Восточной Сибири (асимметрия сезонного хода УФР, сезонный ход коэффициентов вариации УФР, кратковременные увеличения) по данным наземных измерений прямой УФР в отдельных участках ультрафиолетового спектра (296–346 нм).

На территории Западной Сибири не имеется станций мониторинга УФ–*B*-радиации, хотя такие данные необходимы для целого ряда приложений: биоклиматологии, медицины, строительной климатологии и т.п. В настоящей статье приводятся результаты 5-летнего мониторинга ультрафиолетовой *B*-радиации, проводимого авторами в районе г. Томска.

### Оборудование

В октябре 2002 г. радиационный блок измерительного комплекса (TOR-станция) Института оптики

атмосферы [15] был дополнен ультрафиолетовым пиранометром UVB-1 (Yankee Environmental Systems, Inc., США), измеряющим интегральную интенсивность УФ-В-радиации в диапазоне длин волн 280–320 нм. Пиранометр согласуется с ЭВМ посредством специальных преобразователей. Измерения ведутся круглосуточно и ежечасно. Сам цикл измерений продолжается 10 мин, в течение которых производится отсчет параметров с частотой 1 Гц. Итоговый результат, фиксируемый ЭВМ, получается осреднением 600 разовых значений и расчетом среднеквадратического отклонения. Результат измерения УФ-В-радиации записывается на жесткий магнитный диск и хранится в базе данных.

В сентябре 2003 г. совместно с ЦАО в г. Томске в районе Академгородка начались измерения общего содержания озона (ОСО) спектрофотометром Brewer MKIV № 049, а с января 2004 г. на этом же приборе начались регулярные измерения УФР в области ультрафиолетового спектра 290–325 нм с шагом 0,5 нм. Спектрофотометр за период измерений проходил техническое обслуживание и калибровку по вторичному эталону в августе 2003 и 2005 гг. на территории НПО «Тайфун», очередное техническое обслуживание и калибровка намечены на август 2008 г. Спектрофотометр Brewer MKIV измеряет общую УФР с точностью по спектру  $(0,006 \pm 0,002)$  нм. За время, равное 5 мин 25 с, производится проход в обе стороны и получаются два значения на каждой длине волны. Итоговым результатом является спектр, полученный из среднеарифметических значений. Программное обеспечение позволяет получать интегральные значения в заданной области спектра, что дает возможность, обрезая верхнюю границу спектра до 320 нм, сравнивать полученные данные с данными пиранометра UVB-1.

## Результаты измерений

На рис. 1 представлены усредненные значения суточного прихода УФ-В-радиации для каждого дня года по всем годам рассматриваемого периода с последующим сглаживанием скользящим средним по 5 дням.

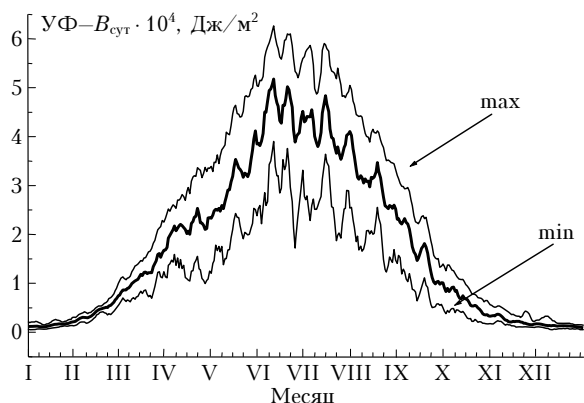


Рис. 1. Среднегодовые вариации суточного поступления УФ-В-радиации, а также их минимальные и максимальные значения

На этом же графике приведены максимальные и минимальные значения суточного прихода УФ-В-радиации для каждого дня года по всем годам анализируемого периода, характеризующие возможную межсуточную изменчивость рассматриваемой величины. В среднегодовом ходе УФ-В-радиации наблюдаются: весеннее повышение суточного прихода в апреле с последующим спадом к началу мая; в летний период — колебания значений УФ-В-радиации с периодами 10–15 дней с характерными пиками (которые в 2 раза длиннее времени естественного синоптического периода).

Аналогичные закономерности получены авторами [9] в результате анализа спутниковых данных о солнечной эритемной УФ-радиации за период 1979–1992 и 1996–2003 гг. для регионов Сибири вблизи гг. Новосибирска, Томска, Красноярска, Иркутска и Горно-Алтайска, причем отмечается, что весенний максимум для Томска оказался выраженным в большей степени.

Основной приход УФ-В-радиации за рассматриваемый период зарегистрирован с мая по сентябрь. Он составил 78% от годового значения. Внутри этого периода максимальный приход УФ-В-радиации наблюдался в июне. Достаточно часто отмечались резкие перепады в межсуточной изменчивости суточных сумм УФ-В-радиации. Например, с 1.06.05 по 12.06.05 амплитуда изменения суточных сумм составила  $50,77$  кДж/м<sup>2</sup>. Коэффициент вариации суточных сумм за теплый период составил 44%. Однако в эту величину входят изменения, обусловленные астрономическими факторами (годовым ходом высоты Солнца и продолжительностью дня).

Чтобы по возможности исключить влияние этих факторов, было использовано отношение суточных сумм за каждый день каждого года к средним значениям за этот же день рассматриваемого периода. Коэффициент вариации этого отношения, характеризующий большую изменчивость суточных сумм за счет погодных условий, составил 31%. На рис. 2, а приведены гистограммы повторяемости суточных сумм УФ-В-радиации в течение теплого периода, когда подстилающая поверхность была однородная.

Видно, что основной процент повторяемости составляют суточные суммы в диапазоне 30–60 кДж/м<sup>2</sup>, а в июне 40% суточных сумм УФ-В-радиации лежит в диапазоне 50–60 кДж/м<sup>2</sup>. В сентябре суточные суммы изменялись в диапазоне 0–40 кДж/м<sup>2</sup> с максимумом в диапазоне 10–20 кДж/м<sup>2</sup> (48%).

Приход УФ-В-радиации в холодный период (январь–апрель, октябрь–декабрь) составил 22%. Суточные суммы УФ-В-радиации с ноября по февраль не превышали 10 кДж/м<sup>2</sup>, а в остальные месяцы распределялись в диапазоне 0–40 кДж/м<sup>2</sup> (рис. 2, б).

Представляет интерес оценка экстремальных суточных сумм УФ-В-радиации для всех месяцев в 2003–2007 гг. Эти данные приведены в табл. 1. Для теплого периода абсолютный максимум суточных сумм наблюдался 12 июня 2005 г. ( $65,75$  кДж/м<sup>2</sup>), а минимум приходится на 30 сентября 2003 г. ( $3,66$  кДж/м<sup>2</sup>).

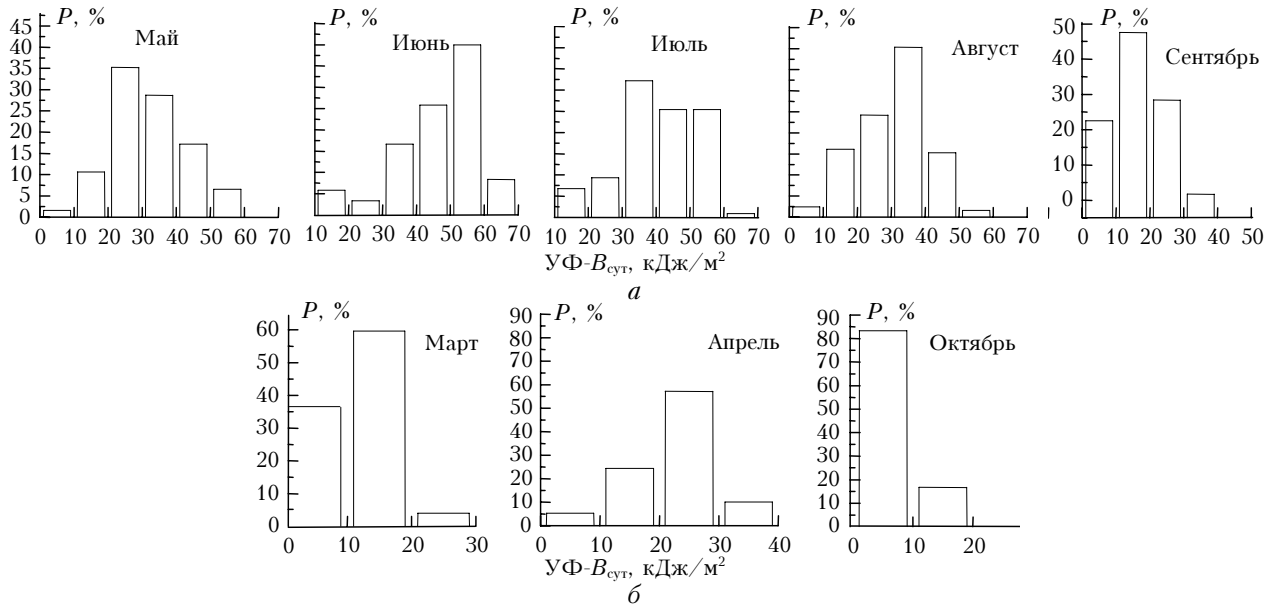


Рис. 2. Повторяемость суточных сумм УФ-В-радиации: а – в теплый, б – в холодный период

Таблица 1  
Средние и экстремальные суточные суммы УФ-В-радиации за 2003–2007 гг., кДж/м<sup>2</sup>

| Месяц    | I     | II    | III    | IV     | V      | VI          | VII    | VIII   | IX          | X      | XI    | XII   |
|----------|-------|-------|--------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------------|--------|-------|-------|
| Среднее  | 1,541 | 4,300 | 11,739 | 21,456 | 32,050 | 46,724      | 40,320 | 30,724 | 16,163      | 6,464  | 2,573 | 1,314 |
| Max      | 3,204 | 9,152 | 23,597 | 37,186 | 56,877 | 65,750      | 61,318 | 50,528 | 30,948      | 16,133 | 5,886 | 4,173 |
| Min      | 0,517 | 1,315 | 4,458  | 6,448  | 5,981  | 12,259      | 11,236 | 8,754  | 3,663       | 0,317  | 0,874 | 0,358 |
| Дата max | 29    | 28    | 28     | 29     | 31     | <b>12</b>   | 13     | 2      | 6           | 2      | 24    | 6     |
|          | 2003  | 2006  | 2003   | 2006   | 2006   | <b>2005</b> | 2005   | 2004   | 2006        | 2005   | 2002  | 2002  |
| Дата min | 11    | 10    | 7      | 8      | 11     | 14          | 24     | 29     | <b>30</b>   | 18     | 29    | 9     |
|          | 2005  | 2006  | 2004   | 2005   | 2006   | 2006        | 2006   | 2006   | <b>2003</b> | 2003   | 2003  | 2006  |

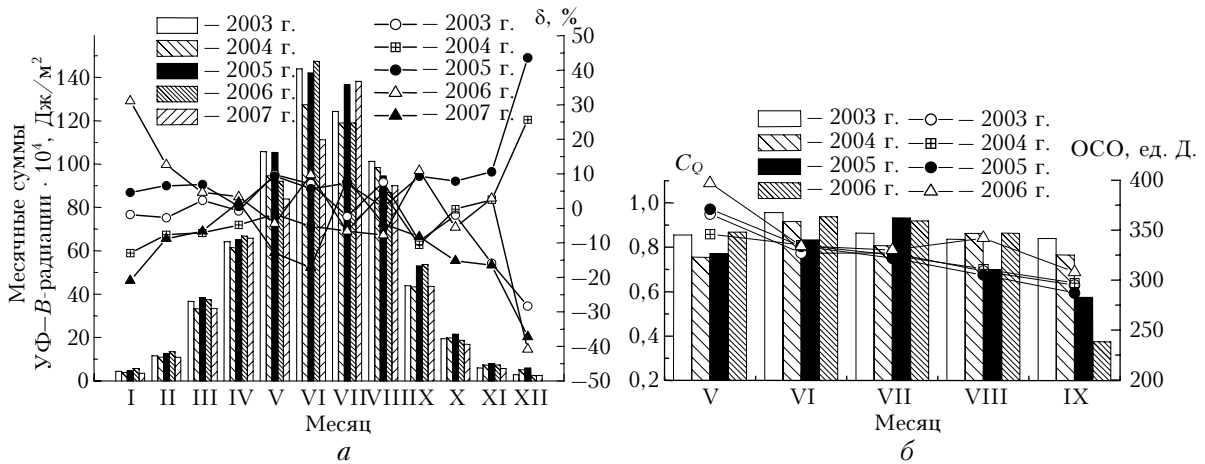


Рис. 3. Годовой ход УФ-В-радиации

На рис. 3, а представлены месячные суммы УФ-В-радиации за период 2003–2007 гг., а в табл. 2 ее сезонные суммы.

Видно, что для условий Западно-Сибирского региона поток УФ-В-радиации в течение года изменяется почти в 70 раз, главным образом за счет астрономического фактора. На рис. 3, а также показана межгодовая изменчивость месячных сумм УФ-В-радиации, наблюдавшаяся в рассматриваемый период [ $\delta = ((y_i - y_{\text{сред}}) / y_{\text{сред}}) \cdot 100\%$ ], где  $y$  – рассматриваемая величина). Колебания в поступлении

Таблица 2  
Сезонные суммы УФ-В-радиации, МДж/м<sup>2</sup>

| Год  | Зима     | Весна    | Лето     | Осень    |
|------|----------|----------|----------|----------|
| 2003 | 0,200254 | 2,064798 | 3,695229 | 0,692870 |
| 2004 | 0,177613 | 1,894151 | 3,448233 | 0,704733 |
| 2005 | 0,224228 | 2,051854 | 3,729654 | 0,822971 |
| 2006 | 0,250513 | 1,962814 | 3,521474 | 0,798616 |
| 2007 | 0,167585 | 1,830639 | 3,393237 | 0,661752 |

Примечание. Для зимы данные за декабрь из предыдущего года, январь и февраль – текущий год.

УФ–В-радиации достаточно велики и могут достигать  $\pm 25\text{--}45\%$ . В теплый период поступление УФ–В-радиации колебалось в пределах  $\pm 10\%$  от среднего. В то же время в мае и в июне 2007 г. наблюдалось уменьшение поступления радиации ( $-17\%$ ), а в июле 2007 г. зарегистрирована максимальная месячная сумма для этого месяца за рассматриваемый период. В холодный период колебания более значительны (в декабре  $\pm 45\%$ ). Надо отметить, что в апреле поступление ультрафиолетовой радиации оставалось практически постоянным, за исключением 2004 г.

Причины, которые могли привести к таким колебаниям уровня УФ–В-радиации, могут быть следующие: изменение общего содержания озона, аэрозольной оптической толщины (АОТ), оптической толщины облаков и количества облаков. За рассматриваемый период аэрозольное содержание атмосферы менялось слабо и среднее значение АОТ на длине волны 550 нм составило  $0,173 \pm 0,004$  [16, 17]. Основными из указанных факторов являются общее содержание озона и количество облачности.

Изменение ОСО в течение года за рассматриваемый период имеет типичный для Томска годовой ход с максимумом в феврале–марте и минимумом в октябре–ноябре. Наибольшее количество общей

облачности наблюдалось в осенне-зимний период, при этом повторяемость пасмурной погоды составила 75%, а среднее количество облачности – 8 баллов. Как показано в [18, 19], сплошной покров облаков (особенно нижнего яруса) в среднем уменьшает потоки суммарной УФ-радиации на 70–85%, поэтому в этот период изменение количества облачности является основным фактором, влияющим на приход УФ–В-радиации.

Для теплого периода (май–сентябрь), характеризующегося однородными условиями подстилающей поверхности, мы попытались оценить аномалии УФ–В-радиации:

1) путем учета облачности, используя величину  $A_i(C_Q) = C_{Q,i,j}/C_{Q,i,j-1} - 1$ , где  $C_Q = Q/Q_0$  – характеристика пропускания УФ–В-радиации облаками;  $Q$  – УФ–В-радиация при наличии облаков, а  $Q_0$  – УФ–В-радиации при ясном небе и при той же высоте Солнца, что и  $Q$ . Использовались значения  $C_Q$  при высоте Солнца более  $18^\circ$ ;

2) путем учета ОСО, используя величину радиационного фактора усиления RAF, принятого равным 1,1;  $A_i(\text{ОСО}) = \text{ОСО}_{i,j}^{\text{RAF}} / \text{ОСО}_{i,j-1}^{\text{RAF}} - 1$  [ $A_i(C_Q)$ ,  $A_i(\text{ОСО})$  – изменчивость УФ–В-радиации за счет количества облачности и озона соответственно;  $i$  – месяц;  $j$  – год].

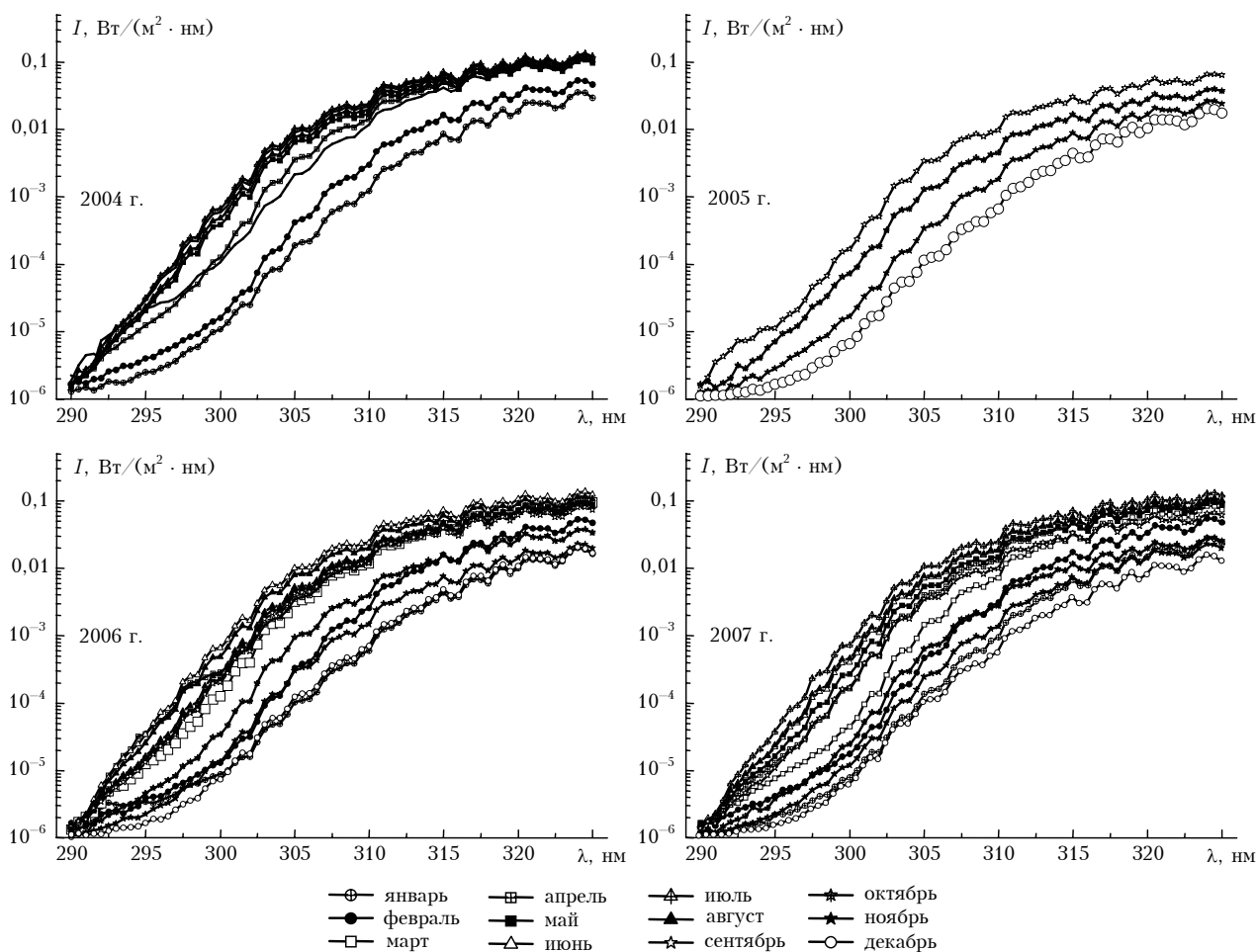


Рис. 4. Среднемесячное распределение интенсивности УФ–В-радиации в разные годы

На рис. 3, б показаны абсолютные значения общего содержания озона ([http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone\\_v8.html](http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/ozone_v8.html)) и пропускания УФ–В-радиации облачностью, полученные за исследуемый теплый период. Видно, что в мае и августе 2006 г. отмечалось увеличение ОСО по сравнению с его величиной в предыдущие годы. Величина пропускания УФ–В-радиации облачностью имеет максимум в июне. Высокие значения УФ–В-радиации в июне 2006 г. по сравнению с июлем 2005 г. связаны только с повышением  $C_Q$  (на 15%) из-за уменьшения повторяемости плотной облачности. Уменьшение УФ–В-радиации в августе 2006 г. по сравнению с августом 2005 г. определяется не только увеличением озона (на 13%), но и увеличением  $C_Q$  (на 23%).

Все приведенные выше данные получены с помощью пиранометра UVB-1, который дает интегральную по спектру величину УФ–В-радиации. Наличие в измерительном комплексе спектрофотометра Brewer позволяет проанализировать изменение ультрафиолетовой радиации и по более мелким интервалам. Такие данные представлены на рис. 4, из которого следует, что основные изменения в приходе УФ–В-радиации в годовом ходе наблюдаются в спектральном интервале 295–310 нм, т.е. в полосе поглощения озона. Это подтверждает важность учета общего содержания озона при интерпретации данных об УФ–В-радиации. Если рассматривать эту динамику в различные годы, то очевидным становится и действие других факторов, но это будет предметом наших дальнейших исследований.

### Заключение

На основании анализа вариаций поступления УФ–В-радиации в г. Томске, выполненного по данным наземных наблюдений в 2003–2007 гг., можно сделать следующие выводы.

Основной вклад в годовую сумму прихода УФ–В-радиации внес теплый период с максимумом в июне, при этом коэффициент вариации суточных сумм составил 31%.

В среднегодовом ходе УФ–В-радиации наблюдаются весеннее повышение суточного прихода в апреле с последующим спадом к началу мая, а также колебания суточного поступления с периодом 10–15 дней с характерными пиками (летний период).

Межгодовая изменчивость месячного поступления УФ–В-радиации достаточно велика и может достигать  $\pm 25$ –45%.

В спектральном ходе наибольшая изменчивость наблюдается в диапазоне 295–310 нм (полосе Хаггинса), которая варьирует от года к году.

Работа выполнена по программе Президиума РАН № 16, программам Отделения наук о Земле РАН № 9 и 11, грантам РФФИ № 06-05-08104, 07-05-00645, 08-05-10033э\_к и проекту МНТЦ № 3032.

1. Иванова Н.С., Крученицкий Г.М., Черников А.А. Создание первой очереди системы мониторинга УФ-радиации в России // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 1. С. 5–9.

2. Ciren P., Li Zh. Long-term global earth surface ultraviolet radiation exposure derived from ISCCP and Toms Satellite measurements // Agric. Forest Meteorol. 2003. V. 120. N 1. P. 51–68.
3. Cede A., Luccini E., Nunez L., Piacentini R.D., Blumthaler M., Herman J.R. TOMS-derived erythermal irradiance versus measurements at the station of the Argentine UV Monitoring Network // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. D08109. doi: 10.1029/2004JD004519.
4. Kazantzidis A., Bais A.F., Grobner J., Herman J.R., Kazadris S., Kyro E., den Outer P.N., Garane K., Gorts P., Lakkala K., Meleti C., Slaper H., Tax R.B., Turunen T., Zerefos C.S. Comparison of satellite-derived UV irradiance with ground-based measurements at four European stations // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D13207. doi: 10.1029/2005D006672.
5. Dutton E.G., Nelson D.W., Stone R.S., Longenecker D., Carlaugh G., Harris J.M., Wendell J. Decadal variations in surface solar irradiance as observed in a remote network // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D19101. doi: 10.1029/2005JD006901.
6. Grobner J., Bais A.F., Kazadris S., Gorts P.C., Tax R.A., Kosnova T., Webb A.R. Quality assurance of spectral solar UV measurements in Europe (QUASUME) // Proc. Quadr. Ozone Symposium. Kos, Greece, 2004. P. 1088–1089.
7. Bais A.F., Kosmidis E., Kazantzidis A., Kazadris S., Topaloglou C., Zerefos C.S. Establishment of a network for UV monitoring in Greece // Proc. Quadr. Ozone Symposium. Kos, Greece, 2004. P. 1065–1066.
8. Bernhard G., Booth C.R., Ehrmanjian J.S. Spectral UV and total ozone observations of the National Science Foundations UV Monitoring Network // Proc. Quadr. Ozone Symposium. Greece, Kos, 2004. P. 259–260.
9. Черниговская М.А., Михалев А.В., Тацлин М.А. Многолетние вариации эритемной ультрафиолетовой радиации в регионах Сибири по данным спутниковых измерений // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 12. С. 1095–1103.
10. Seckmeyer G., McKenzie R.L. Increased ultraviolet radiation in New Zealand (45S) relative to Germany (48N) // Nature (Gr. Brit.). 1992. V. 359. N 6391. P. 135–137.
11. Mantis H.T., Repapis C.C., Philandras C.M., Paliatatos A.G., Zerefos C.S., Bais A.F., Meleti C., Balis D.S. A 5-year climatology of the solar erythemal ultraviolet in Athens, Greece // Int. J. Climatol. 2000. V. 20. P. 1237–1247.
12. Chubarova N.Ye., Nezval I.Ye. Thirty year variability of UV irradiance in Moscow // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105. N 10. P. 12529–12539.
13. 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.
14. Mikhalev A.V., Chernigovskaya M.A., Shalin A.Yu., Kazimirovsky E.S. Variations of the ground-level ultraviolet radiation in East Siberia // Ann. Space Res. 2001. V. 27. N 6–7. P. 1109–1114.
15. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Автоматический пост для контроля качества воздуха // Метеорол. и гидрол. 1999. № 3. С. 110–118.
16. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Полькин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В.,

- Поддубный В.А., Тацлин М.А.* Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 968–975.
17. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщи атмосферы в области спектра 0,37–4 мкм // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 2. С. 156–164.
18. *Чубарова Н.Е.* Пропускание суммарной УФ-радиации облаками разных типов // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1993. Т. 29. № 5. С. 639–645.
19. *Абакумова Г.М., Горбаренко Е.В., Изакова О.М., Невзаль Е.И., Чубарова Н.Е., Шиловецва О.А.* О зависимости пропускания суммарной радиации в различных областях спектра от балла общей облачности // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1998. Т. 34. № 1. С. 141–144.

*B.D. Belan, G.I. Ivlev, T.K. Sklyadneva. Variations of UV-B radiation in Tomsk in 2003–2007.*

The results of the UV-B radiation monitoring carried out with UVB-1 pyranometer and Brewer spectrophotometer (MKIV N 049) at the TOR station of IAO in 2003–2007 are presented. In accordance with the data obtained, there is a spring increase of daily income in the average annual behaviour of UVB radiation in April with a subsequent dip in the beginning of May. Also, the presence of fluctuations (10–15-day period) in daily income with typical peaks during summertime is observed. Maximal variability in spectral behaviour was observed in the 295–310 nm range.