

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.168-171

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СВЕЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

О.В. Антоненко, А.С. Кириллов, Ю.Н. Куликов

ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия

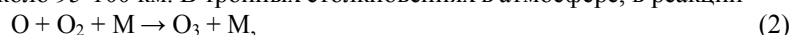
**Аннотация.** Обсуждаются процессы релаксации электронно-возбужденных состояний молекулярного кислорода в атмосфере Земли на высотах свечения ночного неба, где вследствие диссоциации  $O_2$  солнечным УФ-излучением наблюдаются достаточно высокие концентрации атомарного кислорода. Рассматриваются различия значений интегральной светимости возбужденного кислорода  $O_2^*$  для состояний  $O_2^*(A^3\Sigma_u^+, \nu)$  и  $O_2^*(A^1\Delta_g, \nu)$ .

### 1. Введение

Хорошо известно, что в верхней атмосфере Земли эффективно протекает процесс диссоциации молекулярного кислорода  $O_2$  солнечным УФ-излучением ( $\lambda < 240$  нм)

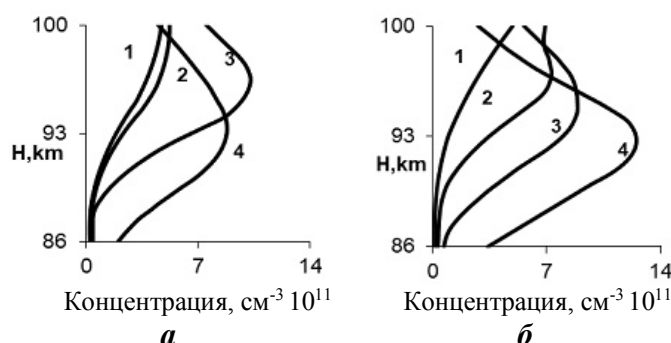


Фотодиссоциация  $O_2$  приводит к образованию заметных концентраций атомарного кислорода  $O$  на высотах более 80 км, с максимумом на высотах около 95-100 км. В тройных столкновениях в атмосфере, в реакции



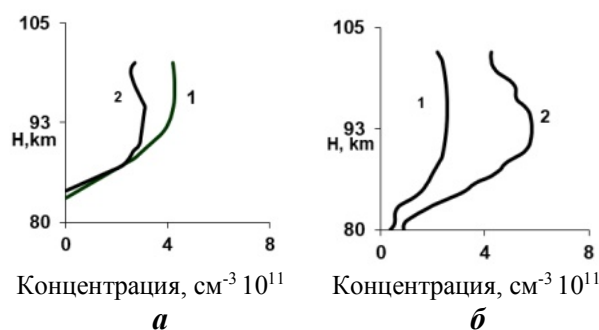
с участием атома и молекулы кислорода (где  $M$  – означает молекулы азота или кислорода) образуется озон  $O_3$ . В результате процессов (1), (2), кислород в атмосфере Земли имеет три устойчивые формы:  $O$ ,  $O_2$  и  $O_3$ .

На рис. 1 представлены высотные распределения концентрации атомарного кислорода  $[O]$  для различных месяцев года для условий низкой (а) ( $F=75$ , 1976 и 1986 г.г.) и высокой (б) ( $F=203$ , 1980 и 1981 г.г.) солнечной активности, восстановленные согласно [1] по данным измерений интенсивности эмиссии 557.7 нм атомарного кислорода на средних широтах (область Звенигорода). Видно, что в течение года происходит значительное изменение как формы распределений концентрации, так и положения максимума концентрации атомарного кислорода, что уже отмечалось ранее в [2]. Увеличение солнечной активности приводит к росту концентрации  $[O]$  в максимуме слоя и опускание его нижней границы, что также указывалось в [3].



**Рисунок 1.** Высотные распределения концентраций атомарного кислорода  $[O]$  для различных месяцев года на средних широтах Земли согласно [1]. 1, 2, 3, 4 – соответственно, январь, апрель, июль, октябрь. (а) ( $F=75$ ), (б) ( $F=203$ ).

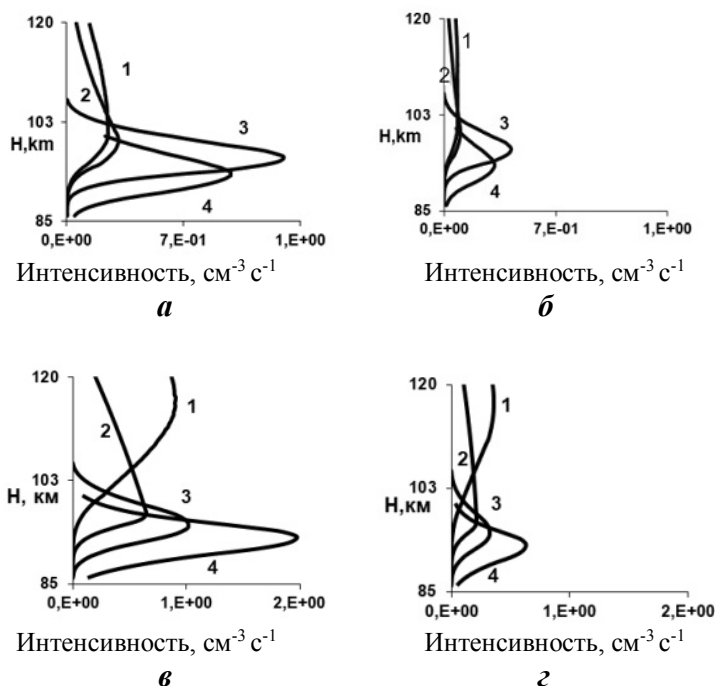
На рис. 2а представлены высотные распределения концентрации атомарного кислорода  $[O]$  в северных тропиках ( $23^\circ N$ ), полученные из орбитальных наблюдений спектрометром OSIRIS [9] в 2005 году около 19:00 LT для сентября-октября 2005 г. (1), включая дни осеннего равноденствия, а также для декабря-января 2005–2006 г.г. (2). Из рис. 2а видно, что максимальные значения концентраций атомарного кислорода, которые приходятся на высоты около 95 км, увеличиваются в осенние месяцы. На рис. 2б приведены ночные распределения для модели суточных вариаций концентрации  $O$ , предложенной авторами [10], в экваториальном регионе для августа (1) и апреля (2) при 00:00 LT. Из рис. 2б видно, что концентрации атомарного кислорода в августе приблизительно в 2.3 раза ниже, чем в апреле. Максимум  $[O]$  приходится на высоты 93–94 км.



**Рисунок 2.** Высотные распределения концентраций атомарного кислорода [O]: (а) – в северных тропиках Земли, согласно [9] (1– сентябрь-октябрь; 2–декабрь-январь); (б) – для модели суточных вариаций, согласно [10] (1– август, 2– апрель).

Индикатором наличия кислорода в атмосфере Земли является ночное свечение различных полос молекулы O<sub>2</sub>. Особенно выделяются широкий спектр полос Герцберга I в диапазоне 300–450 нм (в данной работе рассмотрен переход A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>(v=6)→X<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>(v=3)) и присутствие полос Чемберлена в диапазоне 240–440 нм. В данной работе рассмотрен переход A<sup>13</sup>Δ<sub>u</sub>(v=6)→a<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub>(v=3), где A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup> и A<sup>13</sup>Δ<sub>u</sub> – два электронно-возбужденных состояния Герцберга, а X<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup> и a<sup>1</sup>Δ<sub>g</sub> – основное и синглетное состояния молекулы O<sub>2</sub>.

Цель данной работы – рассчитать на основе имеющихся оценок концентраций атомарного кислорода в области мезопаузы и нижней термосферы Земли вариации концентрации и интегральных интенсивностей ночного свечения полос электронно-возбужденного молекулярного кислорода O<sub>2</sub><sup>\*</sup> для различных географических широт и сезонов в условиях высокой и низкой солнечной активности.



**Рисунок 3.** Рассчитанные высотные распределения объёмной интенсивности излучения для различных месяцев года на средних широтах Земли. 1,2,3,4 – соответственно, январь, апрель, июль, октябрь.

## 2. Свечение ночного неба Земли

Наличие молекулярного кислорода чётко прослеживается в спектрах свечения ночного неба Земли. Еще в начале 60-х годов прошлого века в этих спектрах были обнаружены полосы Герцберга I [4]. Дальнейшие измерения спектров ночного неба [5] также указали на присутствие свечения полос Чемберлена.

В настоящей работе рассчитаны профили высотного распределения концентраций возбуждённого кислорода O<sub>2</sub><sup>\*</sup> для состояний O<sub>2</sub><sup>\*</sup>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>,v) и O<sub>2</sub><sup>\*</sup>(A<sup>13</sup>Δ<sub>u</sub>,v) на высотах верхней атмосферы. Значения объёмной (volume) интенсивности излучения рассчитаны по формуле:

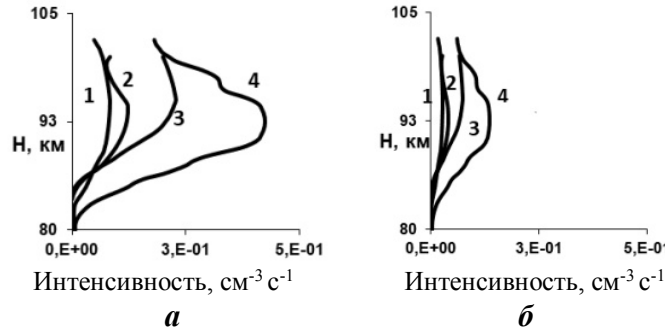
$$I_{vol}(\text{cm}^{-3}\text{c}^{-1}) = [\text{O}_2^*]A, \tag{3}$$

где [O<sub>2</sub><sup>\*</sup>] (см<sup>-3</sup>) – рассчитанная концентрация возбуждённого кислорода в зависимости от высоты [6,7], A (с<sup>-1</sup>)

– вероятность спонтанного излучения для данного энергетического уровня (коэффициент Эйнштейна) [8].

На рис. 3 приведены результаты расчётов объёмных интенсивностей эмиссий, соответствующих переходам  $A^3\Sigma_u^+(v=6) \rightarrow X^3\Sigma_g^-(v=3)$ , (а, в) и  $A^{13}\Delta_u(v=6) \rightarrow a^1\Delta_g(v=3)$ , (б, г) для условий низкой ( $F=75, 1976$  и  $1986$  г.г.) (а, б) и высокой ( $F=203, 1980$  и  $1981$  г.г.) (в, г) солнечной активности на средних широтах Земли.

Аналогично, на рис. 4 приведены результаты расчётов для переходов  $A^3\Sigma_u^+(v=6) \rightarrow X^3\Sigma_g^-(v=3)$  (а) и  $A^{13}\Delta_u(v=6) \rightarrow a^1\Delta_g(v=3)$  (б) для области экватора. Во всех расчетах используется константа скорости реакции рекомбинации при тройном столкновении (3) в зависимости от средней температуры атмосферы ( $T$ ):  $K = 6 \cdot 10^{-34} \cdot (300/T)^{2.3}$  [1].



**Рисунок 4.** Рассчитанные высотные распределения объёмной интенсивности излучения для различных месяцев года в экваториальной области Земли. 1, 2, 3, 4 – соответственно, август, декабрь-январь, сентябрь-октябрь, апрель.

В таблицах 1 и 2 приведены значения интегральной (column) светимости  $I_{col}(\text{cm}^{-2}\text{c}^{-1})$  возбуждённого кислорода  $O_2^*$  для эмиссий, связанных с излучательными переходами  $A^3\Sigma_u^+(v=6) \rightarrow X^3\Sigma_g^-(v=3)$  и  $A^{13}\Delta_u(v=6) \rightarrow a^1\Delta_g(v=3)$ , которые рассчитаны по формуле (3):

$$I_{col} = \int [O_2^*(h)] \cdot A \, dh, \quad (4)$$

где  $[O_2^*(h)]$  – рассчитанные концентрации возбуждённого кислорода [6,7] на высоте  $h$ ,  $A$  ( $\text{c}^{-1}$ ) – вероятность спонтанного излучения (коэффициент Эйнштейна) [8],  $dh = 0.5$  км.

**Таблица 1 (F=75)**

переход $A^3\Sigma_u^+(v=6) \rightarrow X^3\Sigma_g^-(v=3)$				переход $A^{13}\Delta_u(v=6) \rightarrow a^1\Delta_g(v=3)$			
январь	апрель	июль	октябрь	январь	апрель	июль	октябрь
5.78E+07	5.18E+07	8.93E+07	7.45E+07	2.16E+07	1.84E+07	2.89E+07	2.39E+07

**Таблица 2 (F=203)**

переход $A^3\Sigma_u^+(v=6) \rightarrow X^3\Sigma_g^-(v=3)$				переход $A^{13}\Delta_u(v=6) \rightarrow a^1\Delta_g(v=3)$			
январь	апрель	июль	октябрь	январь	апрель	июль	октябрь
4.46E+07	3.54E+07	7.04E+07	1.27E+08	2.34E+06	1.14E+07	2.22E+07	4.05E+07

Аналогично в табл. 3 приведены рассчитанные значения интегральных светимостей возбуждённого кислорода  $O_2^*(A^3\Sigma_u^+)$  и  $O_2^*(A^{13}\Delta_u)$  для экваториальной области Земли.

**Таблица 3**

переход $A^3\Sigma_u^+(v=6) \rightarrow X^3\Sigma_g^-(v=3)$				переход $A^{13}\Delta_u(v=6) \rightarrow a^1\Delta_g(v=3)$			
сентябрь-октябрь	декабрь-январь	апрель	август	сентябрь-октябрь	декабрь-январь	апрель	август
2.37E+07	1.24E+07	5.11E+07	1.14E+07	7.60E+06	3.98E+06	1.64E+07	3.66E+06

Из представленных таблиц видно, что соотношение значений интегральной интенсивности излучения для полос Герцберга I (переход  $A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-$ ) и Чемберлена (переход  $A^{13}\Delta_u \rightarrow a^1\Delta_g$ ) соответствует соотношению значений, приведенных авторами экспериментальных измерений: Бродфута [5], Слэнджера: “...the total Chamberlain band intensity is 40% that of Herzberg I...” [11].

#### 4. Заключение

В результате экспериментальных наблюдений спектров полос молекулярного кислорода в свечении ночного неба Земли [4,5,11] обнаружен широкий спектр полос Герцберга I и Чемберлена. В настоящей работе проведены расчеты профилей высотных распределений объёмных интенсивностей излучения возбуждённого

кислорода  $O_2^*(A^3\Sigma_u^+,v)$  (переход  $A^3\Sigma_u^+(v=6)\rightarrow X^3\Sigma_g^-(v=3)$ ) и  $O_2^*(A^1\Delta_u,v)$  (переход  $A^1\Delta_u(v=6)\rightarrow a^1\Delta_g(v=3)$ ) и получены значения интегральных светимостей полос молекулярного кислорода для указанных переходов на высотах свечения ночного неба в верхней атмосфере Земли.

Показано, что объемные и интегральные интенсивности свечения полос Герцберга I и Чемберлена сильно зависят от содержания атомарного кислорода в верхней атмосфере Земли. Кроме того, показано, что соотношение рассчитанных значений интегральных интенсивностей излучения для полос Герцберга I и Чемберлена соответствует соотношению значений, представленных авторами экспериментальных измерений: Бродфута [5] и Слэнджера [11].

## **Литература**

1. Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор её структуры и динамики // М. ГЕОС, 2006, 741 с.
2. Перминов В.И., Семёнов А.И., Шефов Н.Н. Дезактивация колебательных состояний молекул гидроксила атомарным и молекулярным кислородом в области мезопаузы // Геомагнетизм и Аэронавигация, 1998, т. 38, № 6, с. 642-645.
3. Семёнов А.И., Шефов Н.Н. Вариации температуры и содержания атомарного кислорода в области мезопаузы и нижней атмосферы при изменении солнечной активности // Геомагнетизм и Аэронавигация, 1999, т. 39, № 4, с. 87-91.
4. Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.I. Atlas of the airglow spectrum 3000-12400 E. // Planetary and Space Science, 1962, v. 9, № 12, p. 883-915.
5. Broadfoot A.L., Bellaire P.J., Jr. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow // Journal of Geophysical Research, 1999, v. 104, № A8, p. 17127-17138.
6. Антоненко О.В., Кириллов А.С., Куликов Ю.Н. Образование и гашение состояний Герцберга молекулярного кислорода на высотах свечения ночного неба Земли // Гелиогеофизические исследования в Арктике, Мурманск, 2018, с. 118-121.
7. Antonenko O.V., Kirillov A.S., Kulikov Y.N. The study of production and quenching mechanisms of electronically excited  $O_2$  in the nightglow of planets of terrestrial group // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XLI Annual Seminar, Apatity, 2018, p. 122-125.
8. Bates D.R. Oxygen band system transition arrays. // Planetary and Space Science, 1986, v. 37, № 7, p. 881-887.
9. Sheese P.E., McDade I.C., Gattinger R.L., Llewellyn E.J. Atomic oxygen densities retrieved from Optical Spectrograph and Infrared Imaging // Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 2011, v. 116.
10. Gattinger R.L., Kyrola E., Boone C.D., Evans W.F.J., Walker K.A., McDade I.C., Bernath P.F., Llewellyn E.J. The roles of vertical advection and eddy diffusion in the equatorial mesospheric semi-annual oscillation (MSAO) // Atmos. Chem. Phys., 2013, v. 13, p. 7813–7824.
11. Slinger T.G., Copeland R.A. Energetic Oxygen in the Upper Atmosphere and the Laboratory // Chem. Rev., 2003, v. 103, p. 4731-4765.