

DOI: 10.51981/2588-0039.2022.45.033

## ОСОБЕННОСТИ НОЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ – ПОЛОС ГЕРЦБЕРГА I НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ В ГОДЫ НИЗКОЙ И ВЫСОКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

О.В. Антоненко, А.С. Кириллов

*Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Апатиты, Россия*

### Аннотация

Проведено сравнение рассчитанных значений интенсивностей свечения полос Герцберга I в ночном небе Земли для условий низкой и высокой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне УФ длин волн 3100-3600 Å. Расчеты показали, что наибольшие сезонные вариации объёмных интенсивностей свечения наблюдаются на высотах  $\approx 87-97$  км. Это коррелирует с высотными распределениями отклика температуры атмосферы на солнечную активность: наибольшие сезонные вариации наблюдаются на высотах  $\approx 80-95$  км, причем как для высокой, так и для низкой солнечной активности. Представлены рассчитанные значения интегральной светимости (гистограммы) для расчётных месяцев года при высокой и низкой солнечной активности. Показано, что в период высокой активности наибольшие значения интегральной светимости – в октябре, для низкой солнечной активности – в июле.

**Ключевые слова:** интенсивности свечения, сезонные вариации, расчёты интегральных интенсивностей свечения полос, высотные распределения отклика температур, колебательные уровни, состояния возбуждённого молекулярного кислорода

### 1. Введение

Процессы рекомбинации атомарного кислорода в атмосфере Земли приводят к образованию молекулярного кислорода, излучающего множество эмиссий, и участвуют в термическом режиме атмосферы [1]. Электронно-возбужденные молекулы  $O_2$  излучают молекулярные полосы, располагающиеся от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра свечения атмосферы [2].

Скорости процессов рекомбинации имеют сильную зависимость от температуры атмосферы, которая варьируется как в зависимости от сезона и высоты, так и от солнечной активности. Анализ отклика среднемесячных значений температуры средней атмосферы на солнечную активность на основе многолетних данных, полученных с помощью ракет и спектрофотометрии ряда эмиссий её собственного излучения в течение нескольких циклов 11-летней солнечной активности был выполнен в работе [3]. На основе этих данных, используя разности температур для различных высот профилей, соответствующих годам высокой и низкой солнечной активности, в линейном приближении можно найти скорость приращения температуры под воздействием солнечной активности:

$$\Delta T(Z) = \delta T_F(Z)(F_{10.7} - 130)/100, \text{ (K)}, \quad (1)$$

где  $\delta T_F(Z)$  – изменение температуры на высоте  $Z$  при  $\Delta F_{10.7} = 100$  sfu (solar flux units).

После определения величин  $\delta T_F(Z)$  для отдельных уровней высот были построены сезонные вариации температур [1].

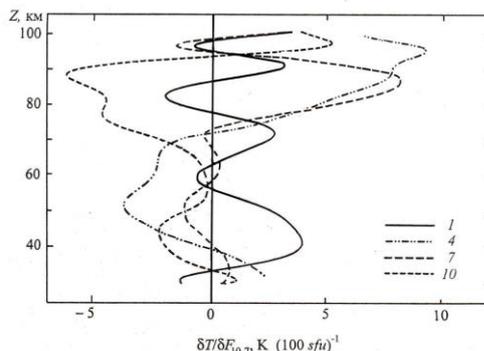


Рисунок 1. Модель отклика температуры на солнечную активность.

На рисунке 1 представлена эмпирическая модель отклика температуры на солнечную активность от высоты и времени года [1], цифрами указаны месяцы: 1-январь, 4-апрель, 7-июль, 10-октябрь. Здесь  $\delta T/\delta F_{10.7}$  K/(100 sfu) - значения отклика температуры атмосферы на солнечную активность при  $\Delta F_{10.7}=100$  sfu. Из представленного рисунка видно, что высотные распределения отклика температуры на солнечную активность на высотах 30–100 км указывают на то, что наибольшие сезонные вариации наблюдаются на высотах  $\approx 80$ -95 км, а минимальные – на высотах  $\approx 55$ –70 км.

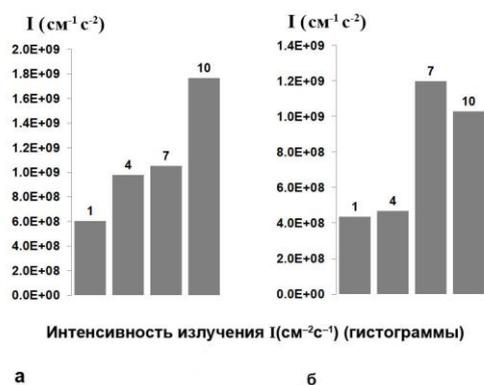
В настоящей работе используются данные по спектрам свечения молекулярного кислорода, полученные со стандартных советских спектрографов СП 48, СП 49, СП 50 в 1957-1959 гг. на средних широтах. Наблюдения были выполнены в период высокой солнечной активности [1]. Также в работе используются спектры, полученные с пика КИТТ на высоте 2080 м (Национальная обсерватория КИТТ – ПИК, США, Аризона), измеренные спектрографом “EbertFastie”.

Цель данной работы – провести сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения полос Герцберга I в диапазоне 250-360 нм с экспериментальными данными интенсивностей свечения молекулярного кислорода  $O_2^*$  в собственном излучении атмосферы Земли в ночное время.

## 2. Описание расчета концентрации возбуждённого кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$

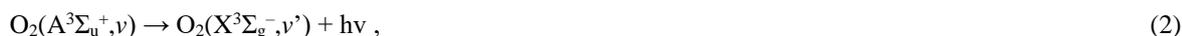
Проведены расчеты концентраций возбуждённого кислорода  $O_2$  ( $cm^{-3}$ ) для состояния  $O_2^*(A^3\Sigma_u^+, \nu)$  на высотах верхней атмосферы Земли для средних широт [4]. При этом были использованы высотные распределения атомарного кислорода O для различных месяцев года как для условий высокой ( $F_{10.7}=203$ , 1980 и 1981 гг), так и низкой ( $F_{10.7}=75$ , 1976 и 1986 гг) солнечной активности на средних широтах ( $55.7^\circ$  N;  $36.8^\circ$  E) (звенигородская обсерватория Института физики атмосферы (ИФА) им. А.М. Обухова РАН). Эти распределения были получены на основании регулярных данных по свечению атомарного кислорода O и полуэмпирической модели, интегрирующей несколько типов различных среднеширотных измерений, регрессионных соотношений и теоретических расчетов на протяжении нескольких десятков лет сотрудниками ИФА [1]. В расчетах применялась константа скорости реакции рекомбинации как рассчитанная величина в зависимости от средней температуры планеты, согласно трудам Н.Н. Шефова [1].

Получены профили высотного распределения объёмной интенсивности излучения возбуждённого кислорода  $i(cm^{-3}c^{-1})$  для высот верхней атмосферы на средних широтах Земли [4] как в условиях высокой, так в условиях низкой солнечной активности. Рассчитанные значения объёмной интенсивности [4] демонстрируют, что наибольшие сезонные вариации наблюдаются на высотах  $\approx 87$ –97 км. Это применимо как для высокой, так и для низкой солнечной активности.



**Рисунок 2.** Рассчитанные интенсивности излучения  $O_2^*$   $I(cm^{-2}c^{-1})$  (гистограммы) для условий высокой и низкой солнечной активности (справа и слева, соответственно).

Рассчитанные значения интенсивности излучения  $O_2^*$   $I(cm^{-2}c^{-1})$  (гистограммы) во всех рассмотренных полосах Герцберга I, обусловленных излучательными переходами



для условий высокой ( $F_{10.7}=203$ , 1980 и 1981 гг.) и низкой ( $F_{10.7}=75$ , 1976 и 1986 гг.) солнечной активности представлены на рисунке 2 (справа и слева, соответственно). Цифрами на рисунке представлены месяцы года: 1-январь, 4-апрель, 7-июль, 10-октябрь. При расчётах использовались данные по концентрациям атомарного кислорода и температурам для средних месяцев каждого сезона. Результирующие гистограммы по каждому месяцу демонстрируют, что для низкой солнечной активности. ( $F_{10.7}=75$ , 1976 и 1986 гг.) максимальное

значение объёмной интенсивности свечения  $O_2^*$  наблюдается для июля, в то время как для высокой ( $F_{10.7}=203$ , 1980 и 1981 гг.) – для октября.

### 3. Результаты моделирования

На рисунке 3 представлен спектр излучения ночной верхней атмосферы в диапазоне УФ длин волн 3100-3600 Å, обусловленный свечением полос Герцберга I (процессы 2) [5]. Наблюдения выполнены в период высокой солнечной активности стандартными советскими спектрографами СП 48, СП 49, СП 50 в 1957-1959 гг. на средних широтах [1]. Соответствующие рассчитанные значения интенсивности излучения полос Герцберга I представлены на данном рисунке в виде гистограмм.

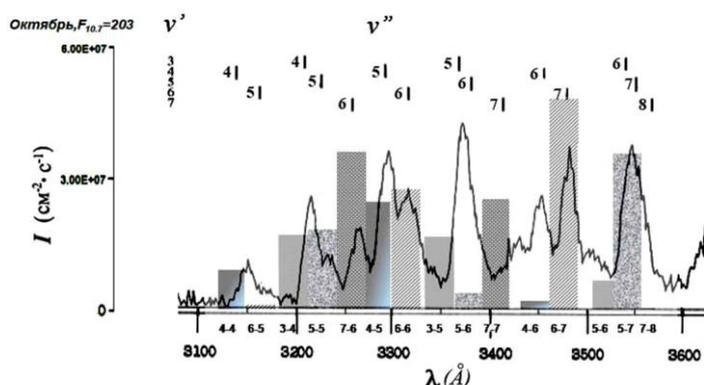


Рисунок 3. Спектр излучения ночной верхней атмосферы (полосы Герцберга I) согласно [5]. Гистограммы – результаты расчетов.

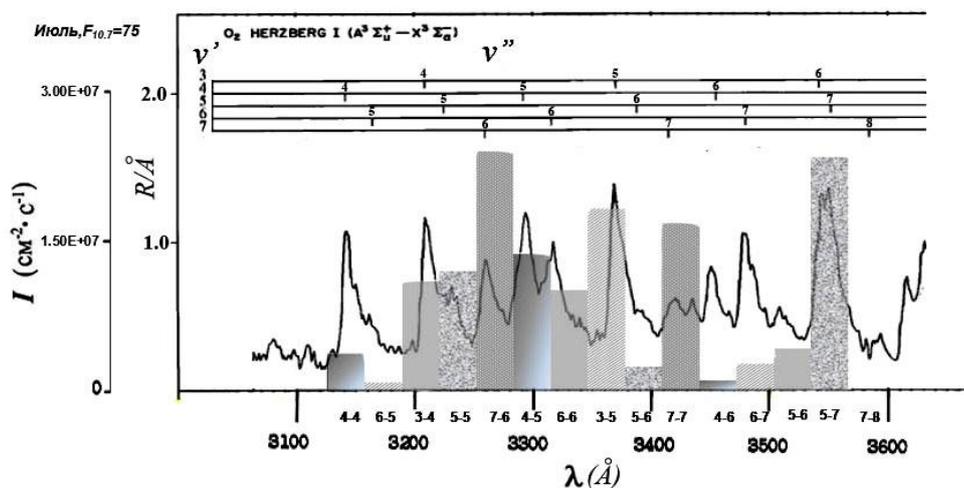


Рисунок 4. Спектр излучения ночной верхней атмосферы, полученных спектрографом “EbertFastie” с пика КИТТ (полосы Герцберга I) согласно [6,7]. Гистограммы – результаты расчетов.

На рисунке 4 представлен диапазон длин волн спектрографа “EbertFastie” с пика КИТТ на высоте 2080 м (Национальная обсерватория КИТТ – ПИК, США, Аризона) [6]. В УФ длинах волн 3100-3600 Å (полосы Герцберга I) использовался ультрафиолетовый источник низкой яркости [7]. Обсерватория функционирует с 1958г, однако, автор описывает наблюдения, ссылаясь на труды 1961-1964 гг – период низкой солнечной активности [8]. Соответствующие рассчитанные значения интенсивности излучения полос Герцберга I представлены на данном рисунке аналогично в виде гистограмм.

Полученные экспериментальные данные по свечению молекулярных полос могут быть использованы при оценке скоростей образования и гашения различных колебательных уровней электронно-возбужденных состояний при различных столкновительных процессах. Лучшее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными удастся получить, благодаря коррекции квантовых выходов образования электронно-возбужденного кислорода при тройных столкновениях и коэффициентов Эйнштейна для процессов излучения (2).

#### 4. Заключение

Расчитанные значения объёмной интенсивности свечения полос Герцберга I молекулярного кислорода в ночной атмосфере Земли демонстрируют, что наибольшие сезонные вариации наблюдаются на высотах  $\approx 87$ – $97$  км. Это коррелирует с высотными распределениями отклика температуры на солнечную активность: наибольшие сезонные вариации наблюдаются на высотах  $\approx 80$ – $95$  км [1].

Представлены расчитанные значения интегральной светимости (гистограммы) для расчётных месяцев года для высокой и низкой солнечной активности. Показано, что в период высокой активности значения интегральной светимости имеют наибольшие значения в октябре, а для низкой солнечной активности – в июле.

Проведено сравнение расчитанных значений интенсивностей излучения полос Герцберга I в условиях высокой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне УФ длин волн 3100–3600 Å. Наблюдения выполнены стандартными наземными советскими спектрографами [5]. Также проведено сравнение расчитанных значений интенсивности излучения полос Герцберга I в условиях низкой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне УФ длин волн 3100–3600 Å. Наблюдения выполнены наземным спектрографом “EbertFastie” с пика КИТТ (США) [6,7].

Сравнение экспериментальных данных с расчитанными значениями интенсивностей свечения полос показало, что лучшее согласие наблюдается после коррекции коэффициентов Эйнштейна согласно [9] для некоторых излучательных переходов (2), а также коррекции значений квантовых выходов электронно-возбуждённых молекул  $O_2(A^3\Sigma_u^+, v)$  в результате тройных столкновений, которые были представлены в [10].

#### Ссылки

1. Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор её структуры и динамики / М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
2. Slanger T.G., Copeland R.A. Energetic Oxygen in the Upper Atmosphere and the Laboratory // Chem. Rev. V.103. №12. P.4731-4765. 2003.
3. Семенов А.И., Перцев Н.Н., Шефов Н.Н., Перминов В.И., Баканас В.В. Расчет высотных профилей температуры и концентрации атмосферы на 30–110 км // Геомагнетизм и Аэронавигация. Т.44. №6. С.835–840. 2004.
4. Антоненко О.В., Кириллов А.С. Моделирование спектра свечения ночного неба Земли для систем полос, излучаемых при спонтанных переходах между различными состояниями молекулы электронно-возбуждённого кислорода // Известия РАН. Серия физическая. Т.85. №3. С.310–314. 2021.
5. Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.T. Atlas of the airglow spectrum  $\lambda\lambda$  3000 – 12400 Å // Planet. Space Sci. V.9. №12. P.883–915. 1962.
6. Broadfoot A.L., Kendall K.R. The Airglow Spectrum, 3100–10,000 Å // J. Geophys. Res. V.73. №1. P.426–428. 1968.
7. Broadfoot A.L., Hunten D.M. Excitation of  $N_2$  band systems in aurora // Can. J. Phys. V.42. №6. P.1212–1230. 1964.
8. Chamberlain J.W. Physics of Aurora and Airglow / Academic Press. New York. 1961.
9. Bates D.R. Oxygen band system transition arrays // Planet. Space Sci. V.37. №7. P.881–887. 1989.
10. Кириллов А.С. Моделирование населенностей колебательных уровней состояний молекулярного кислорода, исходных для полос Герцберга, на высотах нижней термосферы и мезосферы // Геомагнетизм и Аэронавигация. Т.52. №2. С.258–264. 2012.