

Научная статья
УДК 533.951
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.2.009

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ ПОЛОС МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ С КОСМИЧЕСКОГО ШАТТЛА «ДИСКАВЕРИ»

Ольга Владимировна Антоненко¹, Андрей Серафимович Кириллов²

^{1,2}Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

¹antonenko@pgia.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8271-8318>

²<https://orcid.org/0000-0002-0790-3195>

Аннотация

Проводится сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения различных систем полос электронно-возбужденного молекулярного кислорода с экспериментальными данными по ночному свечению O₂, полученными с космического шаттла «Дискавери». Представлены рассчитанные значения интегральной светимости (гистограммы) для расчетных месяцев года Земли. Показано, что на средних широтах Земли в период низкой солнечной активности максимальные значения интегральной светимости для полос Герцберга I и Чемберлена в июле, для Атмосферных полос — в октябре.

Ключевые слова:

молекулярный кислород, полосы Герцберга I и Чемберлена, Атмосферные полосы, значения интегральной светимости, космический шаттл

Original article

COMPARISON OF MODEL CALCULATIONS OF EMISSION INTENSITIES OF DIFFERENT BAND SYSTEMS OF MOLECULAR OXYGEN WITH EXPERIMENTAL DATA OBTAINED FROM THE DISCOVERY SPACE SHUTTLE

Olga V. Antonenko¹, Andrey S. Kirillov²

^{1,2}Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

¹antonenko@pgia.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8271-8318>

²<https://orcid.org/0000-0002-0790-3195>

Abstract

The results of theoretical calculations of the emission intensities of various states of excited molecular oxygen are compared with experimental data on the nighttime glow of O₂ obtained from the Space Shuttle Discovery. The calculated values of the integral luminosity (histograms) for the considered months of the Earth's year are presented. It is shown that at the middle latitudes of the Earth during the period of low solar activity, the maximum values of the integrated luminosity for Herzberg I and Chamberlain bands are in July, for Atmospheric bands — in October.

Keywords:

molecular oxygen, Herzberg I and Chamberlain bands, Atmospheric bands, integrated luminosity values, space shuttle

Введение

Приоритетом для исследований атмосферы Земли, несомненно, являются наземные наблюдения. Тем не менее имеются некоторые особенности наблюдений в различных диапазонах спектра: ультрафиолет значительно поглощается озоном и рассеивается атмосферой. Поэтому атмосфера над местом наблюдения зачастую является оптически плотной. Например, интенсивность излучения атмосферной полосы O₂ (0,0) 762 нм до поверхности Земли доходит более чем на порядок меньше, чем в верхних слоях атмосферы. Однако, излучение этой полосы — одно из наиболее интенсивных эмиссий, причем как в ночном свечении неба, так и в авроральной атмосфере, наблюдаемое с орбиты. Это излучение в 22 раза ярче атмосферной полосы O₂ (0,1), 865 нм, которая регулярно отслеживается наземными наблюдателями. Полоса (0,1) рассматривается как характерная полоса атмосферной системы O₂ в спектре ночного свечения.

Наземные наблюдения могут быть сопоставимы с космическими экспериментами, работающими в режиме моментального снимка с использованием высокопроизводительного оборудования в течение ограниченного времени полета. Поддерживать такие эксперименты может космический шаттл, или космическая транспортная система (STS). В настоящей работе используются значения интенсивности свечения, полученные со спектрографа GLO на борту космического шаттла «Дискавери» (миссия STS-53). Это была

особая миссия, так как шаттл встречался с легендарной отечественной космической станцией «Мир» (1995 г., эксперимент Arizona Airglow Experiment) (Broadfoot and Bellaire, 1999). На рисунке 1 дано схематичное изображение с телескопа слежения шаттла аризонского эксперимента GLO, показывающее слой свечения Земли и звезд над краем свечения атмосферы. На изображении трека виден слой свечения воздуха на высоте по касательной на 100 км и звезды на заднем плане над горизонталью Земли (лимбом). При наклоне щели спектрографа на 15° наклонный диапазон до слоя O_2 в нижней части аппарата — около 1400 км.

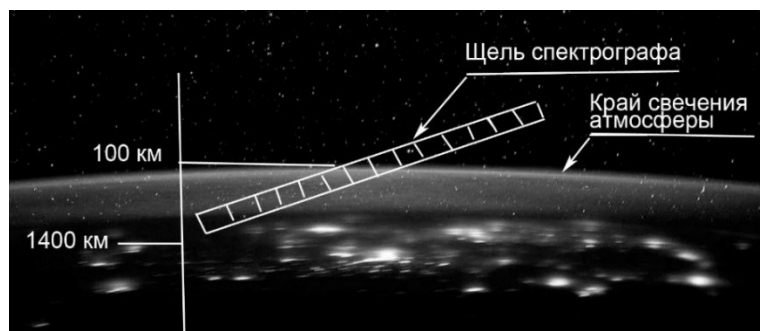


Рис. 1. Схематичное изображение с телескопа слежения шаттла GLO

Молекулярный кислород без сомнения является важнейшим компонентом земной атмосферы. Он поглощает не только ультрафиолетовое излучение Солнца (короче 300 нм), но и с его участием образуются многочисленные химически активные компоненты. Регулярные данные по свечению атомарного кислорода O, используемые в настоящей работе, были получены из полуэмпирической модели, интегрирующей несколько типов различных среднеширотных измерений, регрессионных соотношений и теоретических расчетов на протяжении нескольких десятков лет сотрудниками Института физики атмосферы РАН (Шефов и др., 2006). В соответствии с основными сезонными закономерностями вариаций интенсивности эмиссии 557,7 нм слой атомарного кислорода значительно изменяет положение своего максимума в зависимости от месяца наблюдений (Шефов и др., 2006; Перминов и др., 1998). В результате изменения профилей концентраций атомарного кислорода неизбежно изменяются профили скоростей образования электронно-возбужденного молекулярного кислорода O_2^* в атмосфере Земли и профили интенсивностей свечения различных полос молекулярного кислорода. Поэтому интенсивности свечения рассматриваемых в работе полос Герцберга I, Чемберлена и Атмосферных полос зависят от времени года.

Пять электронных состояний молекулярного кислорода, $a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$, $c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$, являются электронно-возбужденными и метастабильными состояниями, располагающимися ниже первого уровня диссоциации молекулы кислорода $O(^4S) + O(^4S)$. Переходы между ними обуславливают различные системы полос, часть из которых находятся в ультрафиолетовой области спектра, а другие — в инфракрасной (Шефов и др., 2006). В настоящей работе рассматриваются две ультрафиолетовые системы полос: система Герцберга I, система Чемберлен, а также Атмосферная система в инфракрасной области спектра. Все они соответствуют исходным рассмотренным состояниям (Шефов и др., 2006; Bates, 1989). Исследования процессов возникновения эмиссий молекулярного кислорода в ультрафиолетовой и инфракрасной области спектра привели к выводу, что они являются следствием процесса рекомбинации атомарного кислорода (Шефов и др., 2006; Barth, 1964) с участием третьей частицы M (молекулы азота или кислорода на высотах свечения):



Цель данной работы — провести сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения полос Герцберга I, Чемберлена и Атмосферных полос с экспериментальными значениями интенсивности ночного свечения молекулярного кислорода O_2^* в атмосфере Земли, полученными со спектрографа GLO на борту космического шаттла «Дискавери».

Кинетические процессы в ночном небе Земли

На рисунке 2 схематично представлены системы спонтанных излучательных переходов между различными электронными состояниями: полосы Герцберга I $O_2(A^3\Sigma_u^+, v') \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v'')$, Чемберлена $O_2(A'^3\Delta_u, v') \rightarrow O_2(a^1\Delta_g, v'')$, Атмосферные полосы $O_2(b^1\Sigma_g^+, v') \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v'')$, Инфракрасные Атмосферные полосы $O_2(a^1\Delta_g, v') \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v'')$. Все приведенные состояния находятся ниже энергии диссоциации молекулы $O_2 \sim 41300 \text{ см}^{-1}$ ($8065 \text{ см}^{-1} = 1 \text{ эВ}$). Длины волн λ трех рассмотренных в данной работе систем полос можно рассчитать по формулам:

$$\lambda_{HI} = 1/(E_{A(v')} - E_{X(v'')}), \quad (2a)$$

$$\lambda_{Ch} = 1/(E_{A'(v')} - E_{a(v'')}), \quad (2b)$$

$$\lambda_{Atm} = 1/(E_{b(v')} - E_{X(v'')}), \quad (2b)$$

где $E_{A(v')}$ — энергия колебательного уровня v' состояния $A^3\Sigma_u^+$ (см^{-1}); $E_{A'(v')}$ — энергия колебательного уровня v' состояния $A'^3\Delta_u$ (см^{-1}); $E_{b(v')}$ — энергия колебательного уровня v' состояния $b^1\Sigma_g^+$ (см^{-1}); $E_{a(v'')}$ — энергия колебательного уровня v'' состояния $a^1\Delta_g$ (см^{-1}); $E_{X(v'')}$ — энергия колебательного уровня v'' состояния $X^3\Sigma_g^-$ (см^{-1}). Как видно из рис. 2, энергия фотонов ультрафиолетовых полос Герцберга I и Чемберлена намного превосходит энергию фотонов Атмосферных полос, располагающихся в инфракрасном диапазоне.

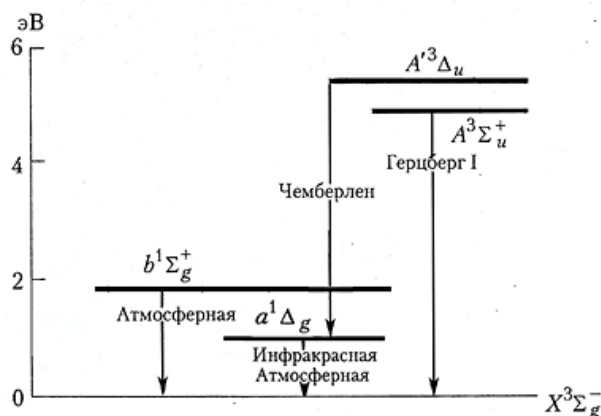
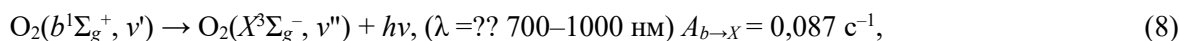
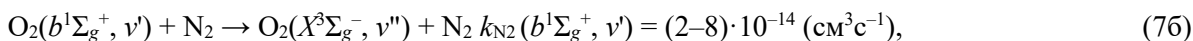
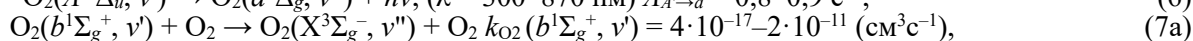
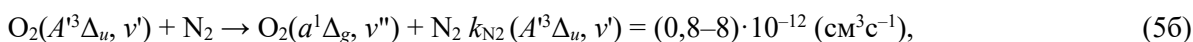
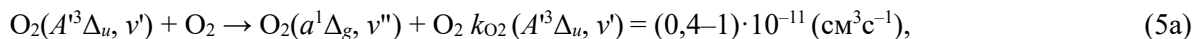
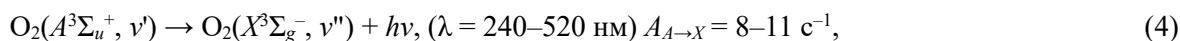
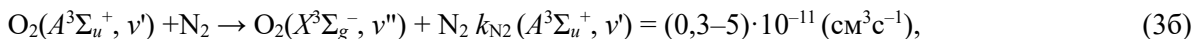
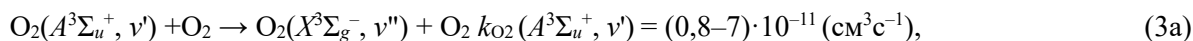


Рис. 2. Схема четырех систем излучательных переходов.

Поскольку переходы между указанными выше состояниями дипольно-запрещенные и излучательные времена жизни высоки, то при расчетах концентраций электронно-возбужденного кислорода необходимо учитывать гашение молекул состояний $A^3\Sigma_u^+$, $A'^3\Delta_u$, $b^1\Sigma_g^+$ не только при излучательных переходах, но и при неупругих столкновениях с молекулами O_2 , N_2 для условий атмосферы Земли (Kirillov, 2014).

При реакции (1) у электронно-возбужденной молекулы кислорода образуется несколько метастабильных состояний. Переходы с состояний $A^3\Sigma_u^+$, $A'^3\Delta_u$ приводят к излучению в ультрафиолетовом диапазоне спектра, с $b^1\Sigma_g^+$ — в инфракрасном диапазоне. Время жизни молекул O_2 в этих метастабильных состояниях определяется как коэффициентами Эйнштейна спонтанного излучения (Bates, 1989), так и скоростями неупругих столкновений с молекулами O_2 и N_2 (Kirillov, 2014):



где O_2 , N_2 — молекулярный кислород и молекулярный азот соответственно; $A_{A \rightarrow X}$, $A_{A' \rightarrow a}$, $A_{b \rightarrow X}$ абсолютные вероятности перехода, соответственно. Формулы (4), (6) и (8) соответствуют излучению полос Герцберга I, Чемберлена и Атмосферной системы соответственно.

Определения абсолютных значений интенсивности систем полос в ультрафиолетовой области спектра, в частности, полос Герцберга I (4) и полос Чемберлена (6), проводились в работах (Ярин, 1961; Hennes, 1966; Slanger and Huestis, 1981; Johnston and Broadfoot, 1993) и во многих других. Как следует из данных измерений для данной спектральной области, интенсивность всей системы полос Герцберг I ~ 600 рэлей (Шефов и др., 2006), но согласно работе (Broadfoot and Bellaire, 1999) ~ 500 рэлей. Интенсивность полос Чемберлена слабее, равна ~ 200 рэлей (Broadfoot and Bellaire, 1999; Шефов и др., 2006). Интенсивности полос Атмосферной системы различаются более чем на порядок между собой. Наиболее интенсивным переходом является полоса (0–0) — 761,9 нм. Второй по значимости является полоса (0–1) 864,5 нм. Другие полосы в излучении атмосферной системы наблюдаются слабо и интенсивности их малы (Slanger et al., 2000). Исследование излучения полос этой системы в верхней атмосфере показало, что область высот возникновения этой эмиссии 90–100 км (Bates, 1982).

Сравнение расчетов интенсивностей свечения O_2 в полосах Герцберга I, Чемберлена и в Атмосферных полосах с экспериментальными данными, полученными с космического шаттла «Дискавери»

Расчет концентраций электронно-возбужденного кислорода для всех рассматриваемых состояний $O_2^* = O_2(A^3\Sigma_u^+, v')$, $O_2(A'^3\Delta_u, v')$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+, v')$ производился согласно формуле:

$$[O_2^*] = q_{v'} \cdot \alpha \cdot k_1 \cdot [O]^2 \cdot ([N_2] + [O_2]) / (A_{v'} + k_{N_2} \cdot [N_2] + k_{O_2} \cdot [O_2]), \quad (9)$$

где α — квантовый выход состояния молекулы при тройных столкновениях (1) (для состояния $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ $\alpha = 0,05$, для $O_2(A'^3\Delta_u)$ $\alpha = 0,12$ (Антоненко и Кириллов, 2021, 2022), для $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ мы условно установили $\alpha = 0,2$); $q_{v'}$ — квантовые выходы колебательных уровней v' этого состояния (значения квантовых выходов $q_{v'}$ для состояний $A^3\Sigma_u^+$, $A'^3\Delta_u$ были представлены в работах (Антоненко и Кириллов, 2021, 2022), для $b^1\Sigma_g^+$ $q_{v'}$ условно подобраны); k_{N_2} , k_{O_2} — константы скоростей реакций гашения электронно-возбужденного кислорода при двойных столкновениях электронно-возбужденного молекулярного кислорода с атмосферными составляющими N_2 и O_2 ($cm^3 s^{-1}$), которые учитывались согласно работам (Кириллов, 2012; Kirillov, 2013, 2014); $A_{v'}$ — сумма коэффициентов Эйнштейна для всех спонтанных излучательных переходов с колебательного уровня v' (для состояний $A^3\Sigma_u^+$, $A'^3\Delta_u$ коэффициенты Эйнштейна взяты согласно работе (Bates, 1989), для $b^1\Sigma_g^+$ — согласно (Шефов и др., 2006); k_1 — константа скорости реакции рекомбинации при тройных столкновениях (1) ($cm^6 s^{-1}$), которая применялась как рассчитанная величина в зависимости от температуры атмосферы на рассмотренном интервале высот согласно работе (Шефов и др., 2006).

В работах (Антоненко и Кириллов, 2021, 2022) квантовые выходы $q_{v'}$ для состояний $A^3\Sigma_u^+$, $A'^3\Delta_u$ были оценены на основании сравнения рассчитанных интенсивностей O_2^* в полосах Герцберга I и Чемберлена с данными, полученными с космического шаттла «Дискавери» (STS-53) (Broadfoot and Bellaire, 1999), поэтому в настоящих расчетах мы используем эти значения.

Согласно формуле (9) проведен расчет профилей высотного распределения концентраций электронно-возбужденного молекулярного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$, $O_2(A'^3\Delta_u)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ в верхней атмосфере Земли. На рисунке 3а представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 250–370 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла «Дискавери» (STS-53) (Broadfoot and Bellaire, 1999) (проводил измерения в интервале от 115 до 900 нм на протяжении его 12-дневной миссии 1995 г.). По осям Y отложены значения интенсивностей в рэлях/ангстрем ($R/\text{\AA}$) ($1P = 10^6$ фотон/ $cm^2 s$), по осям X отложены длины волн в ангстремах ($\lambda(\text{\AA})$). Каждая двойка цифр над пиками свечения обозначает колебательные уровни ($v'-v''$) при излучательном переходе (4). Рассчитанные значения интенсивности излучения I ($cm^{-2} s^{-1}$) (гистограммы) для различных полос Герцберга I, обусловленных переходом (4), для средних широт Земли ($55,7^\circ N$) для 10-го месяца года, 1976 и 1986 гг. (рис. 3б) выполнены в этом же диапазоне длин волн.

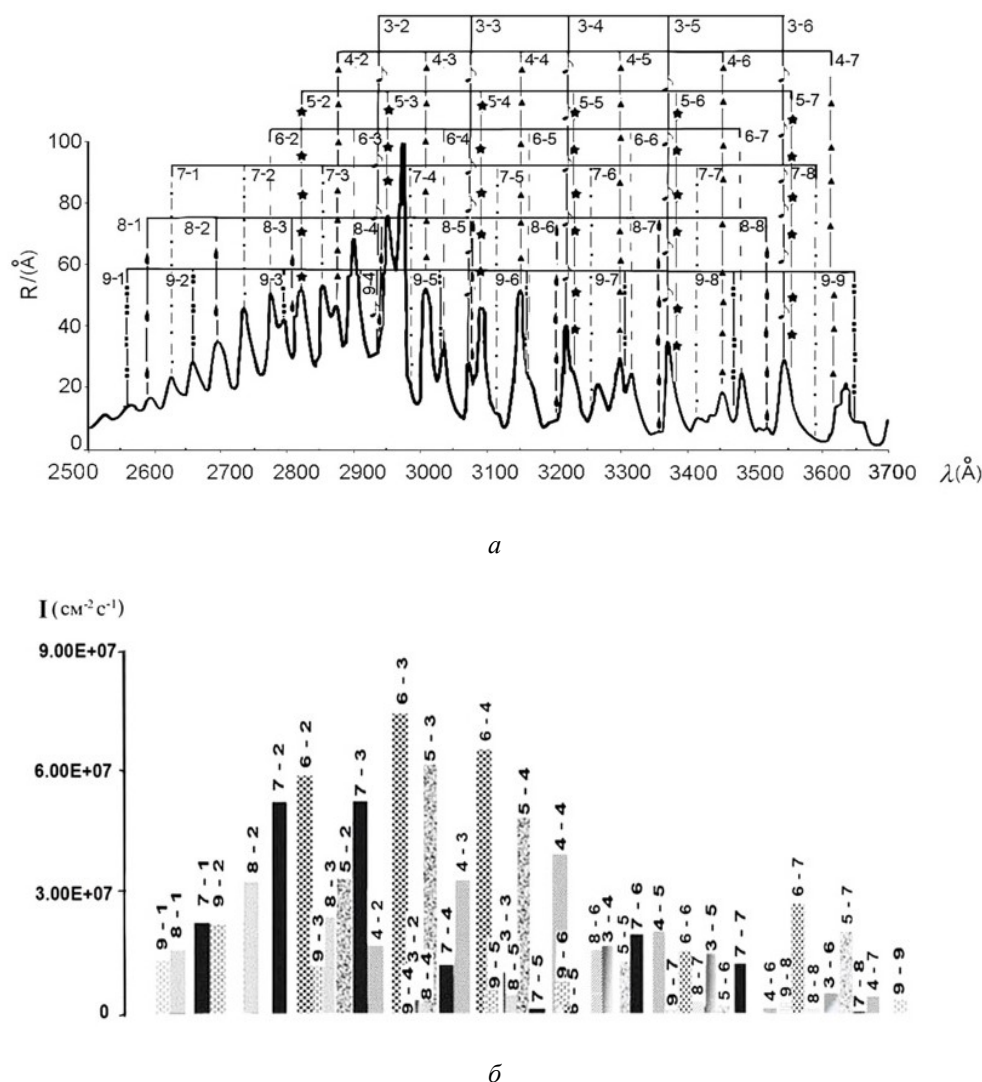


Рис. 3. Спектр свечения ночного неба в диапазоне 250–370 нм: *а* — данные с «Дискавери»; *б* — результаты расчетов

На рисунке 4*а* представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 370–440 нм, а также измеренного спектрографом с космического шаттла «Дискавери» (STS-53) (Broadfoot and Bellaire, 1999): Y — интенсивности ($R/\text{\AA}$), X — длины волн λ ($\text{\AA}$), цифры над пиками — ($v'-v''$) при излучательном переходе (6). Рассчитанные значения интенсивности излучения $I(\text{cm}^{-2}\text{c}^{-1})$ (гистограммы) для различных полос Чемберлена с учетом измененных квантовых выходов q_v , обусловленных переходом (6), для средних широт Земли ($55,7^\circ \text{N}$) для 10-го месяца года, 1976 и 1986 гг. (рис. 4*б*) выполнены в этом же диапазоне длин волн.

На рисунке 5*а* представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 620–900 нм, измеренного также спектрографом с космического шаттла «Дискавери» (STS-53) (Broadfoot and Bellaire, 1999): Y — интенсивности ($R/\text{\AA}$), X — длины волн λ ($\text{\AA}$), цифры над пиками — ($v'-v''$) при излучательном переходе (8). Рассчитанные значения интенсивности излучения $I(\text{cm}^{-2}\text{c}^{-1})$ (гистограммы) для системы Атмосферных полос, обусловленных переходом (8), для средних широт Земли ($55,7^\circ \text{N}$) для 10-го месяца года, 1976 и 1986 гг. (рис. 5*б*) выполнены в этом же диапазоне длин волн.

[illegible]

Transition	Intensity I ($\text{cm}^{-2} \text{c}^{-1}$)
2-0	~0.5 E+08
1-0	~0.5 E+08
2-1	~0.5 E+08
0-0	~2.50 E+08
1-1	~0.5 E+08
2-2	~1.0 E+08
0-1	~0.5 E+08
1-2	~0.5 E+08
0-2	~0.5 E+08

82

При этом при расчете интенсивностей излучения $I_{\nu\nu'}$ для всех рассматриваемых в работе диапазонов длин волн используется приближение оптически тонкого слоя, то есть пренебрегается поглощением фотонов внутри слоя. Кроме того, на рис. 6 представлены рассчитанные значения общей интегральной светимости (I , $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$, гистограммы) для всей рассмотренной системы полос Герцберга I в диапазоне 250–370 нм (рис. 6а), системы полос Чемберлена в диапазоне 370–440 нм (рис. 6б), системы Атмосферных полос в диапазоне 600–900 нм (рис. 6в). Интенсивности рассчитаны для условий 1976 и 1986 гг. (низкая солнечная активность).

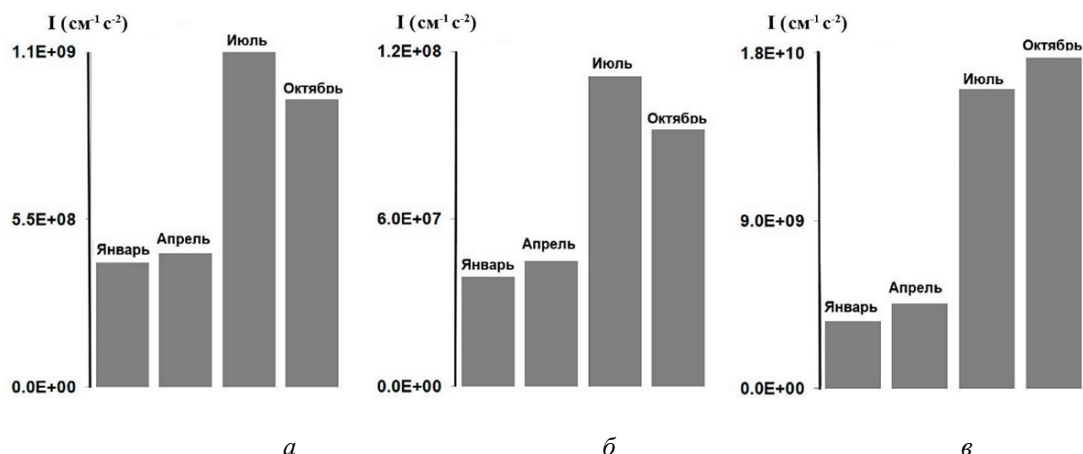


Рис. 6. Рассчитанные интегральные светимости полос Герцберга I (а), полос Чемберлена (б), Атмосферных полос (в) для января, апреля, июля и октября

Из рисунка видно, что наибольшие значения интенсивностей для условий низкой солнечной активности (1976 и 1986 гг.) для полос Герцберга I и Чемберлена в июле, для системы Атмосферных полос — в октябре.

Заключение

Проведено сравнение рассчитанных значений интегральной светимости полос Герцберга I, Чемберлена и Атмосферных полос на средних широтах Земли с экспериментальными данными, полученными спектрографом на космическом Шаттле (Broadfoot and Bellaire, 1999) в диапазоне длин волн 250–360 нм для полос Герцберга I, в диапазоне 370–440 нм для полос Чемберлена, в диапазоне 650–900 нм для Атмосферных полос. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными значениями интенсивностей свечения полос на Земле показало, что наблюдается хорошее согласие данных со значениями в указанных выше диапазонах длин волн.

Представлены рассчитанные значения интегральной светимости (гистограммы) для расчетных месяцев 1976 и 1986 гг. Земли. Показано, что на средних широтах Земли максимальные значения интегральной светимости для полос Герцберга I и Чемберлена в июле, для системы Атмосферных полос — в октябре.

Список источников

1. Антоненко О. В., Кириллов А. С. Моделирование спектра свечения ночного неба Земли для систем полос, излучаемых при спонтанных переходах между различными состояниями молекулы электронно-возбужденного кислорода // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 3. С. 310–314.
2. Антоненко О. В., Кириллов А. С. Моделирование интенсивности свечения полос Чемберлена и Герцберга I в ночном небе Земли и сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными // Геомагнетизм и аэронавигация. 2022. Т. 62, № 5. С. 661–670.
3. Кириллов А. С. Расчет констант скоростей взаимодействия синглетного и триплетного колебательно-возбужденного молекулярного кислорода // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 7. С. 653–658.

4. Перминов В. И., Семёнов А. И., Шефов Н. Н. Дезактивация колебательных состояний молекул гидроксила атомарным и молекулярным кислородом в области мезопазузы // Геомagnetизм и аэрoнoмия. 1998. Т. 38, №6. С. 642–645.
5. Шефов Н. Н., Семёнов А. И., Хомич В. Ю. Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС. 2006, 741 с.
6. Ярин В. И. Непрерывный спектр и полосы Герцберга молекулы O_2 в излучении ночного неба // Спектральные, электрофотометрические и радиолокационные исследования полярных сияний и свечение ночного неба. М.: АН СССР, 1961. № 5. С. 35–38.
7. Barth C. A. Tree-body reaction // Ann. Geophys. 1964. V. 20, № 2. P. 182–196.
8. Bates D. R. Airglow and auroras // Applied Atomic Collision Physics. vol. 1 Atmospheric Physics and Chemistry / eds. by H. S. W. Massey and D. R. Bates, Academic Press. 1982. P. 149–224.
9. Bates D. R. Oxygen band system transition arrays // Planet. Space Sci. 1989. V. 37, № 7. P. 881–887.
10. Broadfoot A. L., Bellaire P. J., Jr. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, № A8. P. 17127–17138.
11. Hennes J. P. Measurement of the ultraviolet nightglow spectrum // J. Geophys. Res. 1966. V. 71, № 3. P. 763–770.
12. Johnston J. E., Broadfoot A. L. Midlatitude observations of the night airglow // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, № A12. P. 21593–21603.
13. Kirillov A. S. The calculations of quenching rate coefficients of $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$ in collisions with O_2 , N_2 , CO , CO_2 molecules // Chem. Phys. 2013. V. 410. P. 103–108.
14. Kirillov A. S. The calculation of quenching rate coefficients of O_2 Herzberg states in collisions with CO_2 , CO , N_2 , O_2 molecules // Chem. Phys. Lett. 2014. V. 592. P. 103–108.
15. Slinger T. G., Huestis D. L. O_2 emission in the terrestrial nightglow // J. Geophys. Res. 1981. V. 88, № A5. P. 3551–3554.
16. Slinger T. G., Cosby P. P., Huestis D. L., Osterbrock D. E. Vibrational level distribution of O_2 in the mesosphere and lower thermosphere region // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, № D16. P. 20557–20564.

References

1. Antonenko O. V., Kirillov A. S. Modelirovaniye spectra svecheniya nochnogo neba Zemli dlya system polos izluchaemykh pri spontannykh perekhodakh mezhdu razlichnymi sostoyaniyami molekuly elektronno-vozbuzhdenного kislороda [Modeling the Earth's nightglow spectrum for systems of bands emitted at spontaneous transitions between different states of electronically excited oxygen molecules]. *Izvestiya RAN. Seriya physicheskaya* [Bulletin of the RAS: Physics], 2021, vol. 85, no. 3, pp. 219–223. (In Russ.).
2. Antonenko O. V., Kirillov A. S. Modelirovaniye intensivnosti svecheniya polos Chamberlana i Gertsberga I v nochnom nebe Zemli i sravneniye rezultatov raschetov s eksperimentalnymi dannymi [Modeling the Earth's nightglow intensity of the Chamberlain and Herzberg I bands and comparing the calculation results with the experimental data]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy], 2022, vol. 62, no. 5, pp. 461–469. (In Russ.).
3. Kirillov A. S. Raschet constant skorostey vzaimodeystviya singletного i tripletnого kolebatelno-vozbuzhdenного molekulyarnого kislороda [Calculation of the rate constants of interaction of singlet and triplet vibrationally excited molecular oxygen]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum electronics], 2012, vol. 42, no. 7, pp. 653–658. (In Russ.).
4. Perminov I., Semenov A. I., Shefov N. N. Dezaktivatsiya kolebatelnykh sostoyaniy molekul gidroksila atomarnym i molekulyarnym kislородом v oblasti mezopauzy [Deactivation of vibrational states of hydroxyl molecules by atomic and molecular oxygen in the mesopause region]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy], 1998, vol. 38, no. 6, pp. 642–645. (In Russ.).
5. Shefov N. N., Semyonov A. I., Khomich V. Yu. *Izlucheniye verkhney atmosfery — indikator yeye struktury i dinamiki* [The radiation of the upper atmosphere is an indicator of its structure and dynamics]. Moscow, GEOS, 2006, 741 p. (In Russ.).
6. Yarin V. I. Nepreryvnyi spektr i polosy Gertsberga moleuly O_2 v izlucheniye nochnogo neba [Continuous spectrum and Herzberg bands of the O_2 molecule in the radiation of the night sky]. *Spektralnye, elektrophotometricheskiye i radiolokatsionnye issledovaniya polyarnykh siyaniy i svecheniye nochnogo neba* [Spectral, electrophotometric and radar studies of polar lights and night sky glow], Moscow, AS USSR, 1961, no. 5, pp. 35–38.
7. Barth C. A. Tree-body reaction. Ann. Geophys., 1964, vol. 20, no. 2. pp. 182–196.

8. Bates D. R. Airglow and auroras. Applied Atomic Collision Physics. vol. 1 Atmospheric Physics and Chemistry / eds. by H.S.W. Massey and D.R. Bates, Academic Press, 1982, pp.149–224.
9. Bates D.R. Oxygen band system transition arrays. Planet. Space Sci., 1989, vol. 37, no. 7, pp. 881–887.
10. Broadfoot A. L., Bellaire P. J., Jr. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow. J. Geophys. Res., 1999, vol. 104, no. A8, pp. 17127–17138.
11. Hennes J. P. Measurement of the ultraviolet nightglow spectrum. J. Geophys. Res., 1966, vol. 71, no. 3, pp. 763–770.
12. Johnston J. E., Broadfoot A. L. Midlatitude observations of the night airglow. J. Geophys. Res., 1993, vol. 98, no. A12, pp. 21593–21603.
13. Kirillov A. S. The calculations of quenching rate coefficients of $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$ in collisions with O_2 , N_2 , CO , CO_2 molecules. Chem. Phys., 2013, vol. 410, pp. 103–108.
14. Kirillov A. S. The calculation of quenching rate coefficients of O_2 Herzberg states in collisions with CO_2 , CO , N_2 , O_2 molecules. Chem. Phys. Lett., 2014, vol.592, pp. 103–108.
15. Slanger T. G., Huestis D. L. O_2 emission in the terrestrial nightglow. J. Geophys. Res., 1981, vol. 88, no. A5, pp. 3551–3554.
16. Slanger T. G., Cosby P.P. C., Huestis D. L., Osterbrock D. E. Vibrational level distribution of O_2 in the mesosphere and lower thermosphere region. J. Geophys. Res., 2000, vol. 105, no. D16, pp. 20557–20564.

Информация об авторах

О. В. Антоненко — младший научный сотрудник;

А. С. Кириллов — доктор физико-математических наук, зав. лабораторией.

Information about the authors

O. V. Antonenko — junior research fellow;

A. S. Kirillov — Doctor of Physics and Mathematics, Head laboratory.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023; принята к публикации 03.05.2023.
The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023; accepted for publication 03.05.2023.