

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.026

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНЫХ АТМОСФЕР ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ И ИНФРАКРАСНЫХ ПОЛОСАХ

О.В. Антоненко, А.С. Кириллов

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

Аннотация

В настоящей работе рассматриваются особенности излучения ночных атмосфер Земли и Марса в полосах Герцберга I и Атмосферных полосах. Выполнено сопоставление теоретических расчетов значений интенсивностей свечения полос Герцберга I и Атмосферных полос с экспериментальными данными, полученными спектрографом с космических шаттлов «Дискавери» и «Индевор», соответственно. Расчёты выполнялись по экспериментальным данным о концентрациях атомарного кислорода для определенных широт и сезонов Земли и Марса. Показано, что наблюдается хорошее согласие теоретических расчётов с экспериментальными данными для рассмотренных широт и сезонов Земли, в то время как для условий Марса наблюдается лишь некоторое соответствие теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: интенсивности свечения, различные полосы излучения, ИК спектрограф, космический шаттл, расчёты интегральных интенсивностей полос, высотные распределения атомарного кислорода, колебательные уровни, возбуждённый молекулярный кислород.

1. Введение

Исследования процессов возникновения эмиссий молекулярного кислорода в ультрафиолетовой и инфракрасной области привели к выводу, что они являются следствием процесса рекомбинации атомарного кислорода и образования электронно-возбужденного молекулярного кислорода, способного излучать различные эмиссии [1]. Молекулярный кислород имеет шесть электронных состояний, являющихся метастабильными и коррелирующими с основными состояниями атомов кислорода ($^3P+^3P$). Переходы между этими состояниями обуславливают различные систем полосы. Шесть из них находятся в ультрафиолетовой области спектра, три – в инфракрасной [2]. В настоящей работе рассматривается ультрафиолетовая система полос Герцберга I, а также Атмосферная система, которая находится в инфракрасной области спектра. Все они соответствуют исходным метастабильным состояниям [3].

Цель данной работы – сравнение теоретических расчетов интенсивностей свечения полос Герцберга I и Атмосферных полос молекулярного кислорода O_2^* в ночном небе Земли и в условиях ночного неба Марса с экспериментальными данными, полученными во время запуска космического шаттла.

2. Кинетические процессы собственного излучения атмосферы

Свечение молекулярного кислорода в ближнем ИК-диапазоне (1–1.7 мкм) кроме того, что оно, несомненно, присутствует на Земле, регистрируется на Марсе спектрометром SPICAM на борту Mars Express. Согласно [4] инфракрасное атмосферное излучение на Марсе является наиболее интенсивным. Молекулы $O_2^*(a^1\Delta_g)$ излучают эмиссии в инфракрасном диапазоне, причем одной из характерных является полоса 1.27 мкм, обусловленная спонтанным излучательным переходом:



Но не все молекулы, находящиеся в $O_2^*(a^1\Delta_g)$ состоянии, образуются в результате реакции трёхчастичной рекомбинации. Некоторые из них образуются и в более высокоэнергетических возбужденных состояниях, из которых в процессе релаксации до состояния $a^1\Delta_g$ может произойти переход в это состояние [5].

Также на Марсе присутствуют и молекулы $O_2^*(b^1\Sigma_g^+)$, аналогично излучающие в инфракрасном диапазоне, переход «Атмосферные полосы»:



и молекулы $O_2^*(A^3\Sigma_u^+)$, излучающие в ультрафиолетовом диапазоне, полосы Герцберга I, переход:



где $A(a-X)$, $A(b-X)$, $A(A-X)$, абсолютные вероятности переходов, соответственно, инфракрасной Атмосферной системы, Атмосферной системы, полос Герцберга I, формулы (1), (2) и (3) – соответствуют вышеперечисленным переходам. На Земле наиболее интенсивно излучаются полосы Герцберга I.

На рисунке 1 схематично представлены переходы, рассматриваемые выше, соответственно, Инфракрасная Атмосферная система, Атмосферная система, Герцберга I. Также из рисунка 1 видно, что возбуждённые молекулы кислорода состояний $O_2^*(a^1\Delta_g)$, $O_2^*(b^1\Sigma_g^+)$ могут образовываться в процессе релаксации более высокоэнергетичных возбужденных состояний. Это переходы Ричарда-Джонсона, Чемберлена, Бройда – Гейдона и Ноксона. Все приведенные состояния находятся ниже энергии диссоциации молекулы $O_2 \sim 41300 \text{ см}^{-1}$ ($8065 \text{ см}^{-1} = 1 \text{ эВ}$).

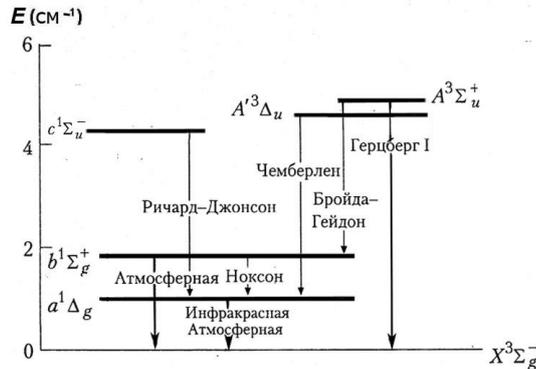


Рисунок 1. Схема переходов между различными электронными состояниями.

Как видно из рисунка 1, возбуждённые молекулы кислорода состояний $O_2^*(a^1\Delta_g)$, $O_2^*(b^1\Sigma_g^+)$ образуются в процессе релаксации более высокоэнергетичных возбужденных состояний. Это переходы Ричарда-Джонсона, Чемберлена, Бройда – Гейдона и Ноксона.

Поскольку кинетика состояний Герцберга I и Атмосферных полос на рассматриваемом диапазоне высот атмосферы во многом определяется столкновительными процессами, наряду с излучательными, при расчете концентраций электронно-возбужденного кислорода $O_2^*(A^3\Sigma_u^+, v')$ и $O_2^*(b^1\Sigma_g^+)$ в атмосфере Земли, где на рассматриваемых высотах преобладают молекулы азота N_2 и кислорода O_2 , а в атмосфере Марса, соответственно, преобладают молекулы CO_2 , применяются следующие формулы:

$$[O_2^*(A^3\Sigma_u^+, v'; b^1\Sigma_g^+, v')] = \alpha(A;b) q_v(A;b) k [O]^2 ([N_2] + [O_2]) / (A_v(A;b) + k_{N_2} [N_2] + k_{O_2} [O_2]), \quad (4a)$$

$$[O_2^*(A^3\Sigma_u^+, v'; b^1\Sigma_g^+, v')] = \alpha(A;b) q_v(A;b) k [O]^2 ([CO_2]) / (A_v(A;b) + k_{CO_2} [CO_2]), \quad (4б)$$

где $\alpha(A;b)$ – квантовый выход состояния ($A^3\Sigma_u^+$; $b^1\Sigma_g^+$), при тройных столкновениях частиц [6], $q_v(A;b)$ – квантовый выход колебательного уровня v' состояния ($A^3\Sigma_u^+$; $b^1\Sigma_g^+$) [7,8], k – константа скорости реакции рекомбинации при тройных столкновениях [2], k_{N_2} , k_{O_2} – константы скоростей реакций гашения данного состояния при неупругих столкновениях с молекулами N_2 , O_2 в атмосфере Земли [9,10] (4а), k_{CO_2} – с молекулами CO_2 в атмосфере Марса [2] (4б), $A_v(A;b)$ – сумма коэффициентов Эйнштейна для всех спонтанных излучательных переходов с колебательного уровня v' состояния ($A^3\Sigma_u^+$; $b^1\Sigma_g^+$) на все колебательные уровни состояния $X^3\Sigma_g^-$ [2,3].

При расчете концентраций $O_2^*(A^3\Sigma_u^+, v'; b^1\Sigma_g^+, v')$ в атмосфере Земли согласно (4а) используются экспериментальные данные о характерных концентрациях $[O]$ в верхней атмосфере Земли на основании характеристик свечения атомарного кислорода O для различных месяцев года на средних широтах ($55.7^\circ N$; $36.8^\circ E$), Звенигородская обсерватория ИФА [2] (рисунок 2а). Для расчетов концентраций O_2^* в верхней атмосфере Марса (согласно 4б) высотные распределения концентраций атомарного кислорода $[O]$ берутся из модели общей циркуляции французской лаборатории динамической метеорологии, называемой LMD-MGCM [4] на северных широтах ($67^\circ N$) и в экваториальной зоне ($Ls-0^\circ$, $Ls-180^\circ$) (рисунок 2б). В соответствии с основными сезонными закономерностями вариаций интенсивности эмиссии 557.7 нм слой атомарного кислорода в атмосфере Земли так же значительно изменяет положение своего максимума [2, 11], причем высота максимальных значений абсолютных концентраций атомарного кислорода также остаётся не постоянной. Этого мы не можем сказать о Марсе, т.к. разброс значений абсолютных концентраций атомарного кислорода малозаметен по сравнению со значениями для атмосферы Земли.

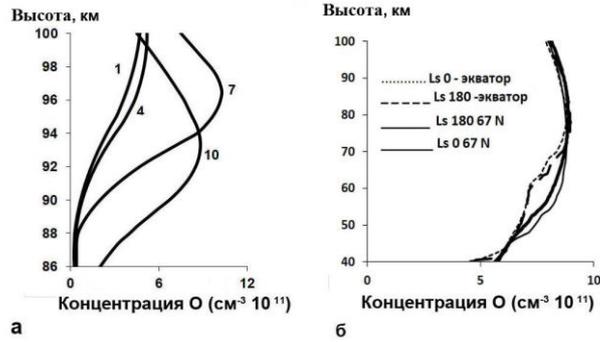


Рисунок 2. Высотные профили концентраций атомарного кислорода [O] для атмосферы Земли и Марса.

3. Сопоставление результатов расчётов интенсивностей излучения полос Герцберга I и Атмосферных полос для условий Земли и Марса и сравнение этих результатов с экспериментальными данными, полученными с космических шаттлов

При расчетах значений концентраций электронно-возбужденного кислорода для атмосферы Земли (формула (4a)) использовались высотные профили температур, составленные на основе данных многолетних (1960–2000 гг.) измерений профилей температуры на высотах 30–110 км [12]. Высотные профили температур, используемые при расчётах значений концентраций электронно-возбужденного кислорода в атмосфере Марса (формула (4б)), получены из модели общей циркуляции (LMD-MGCM) [4]. Расчеты концентраций электронно-возбужденного кислорода $O_2^*(A^3\Sigma_u^+, v'; b^1\Sigma_g^+, v')$ на высотах верхней атмосферы Земли для широты $55.7^\circ N$ проведены для колебательных уровней $v'=2-9$ состояния Герцберга I $A^3\Sigma_u^+$, состояния Атмосферной полосы $b^1\Sigma_g^+$ для различных месяцев года (средних месяцев каждого сезона: января, апреля, июля, октября) 1980 и 1981 гг. [2]. Аналогичные расчеты концентраций $O_2^*(A^3\Sigma_u^+, v'; b^1\Sigma_g^+, v')$ на высотах верхней атмосферы Марса были проведены для экваториальной зоны и для северных широт ($67^\circ N$) во время весеннего (Ls~ 0°) и осеннего (Ls~ 180°) равноденствия. При расчёте интенсивностей излучения $I_{v,v'}$ используется приближение оптически тонкого слоя, т.е. пренебрегается поглощением фотонов внутри слоя.

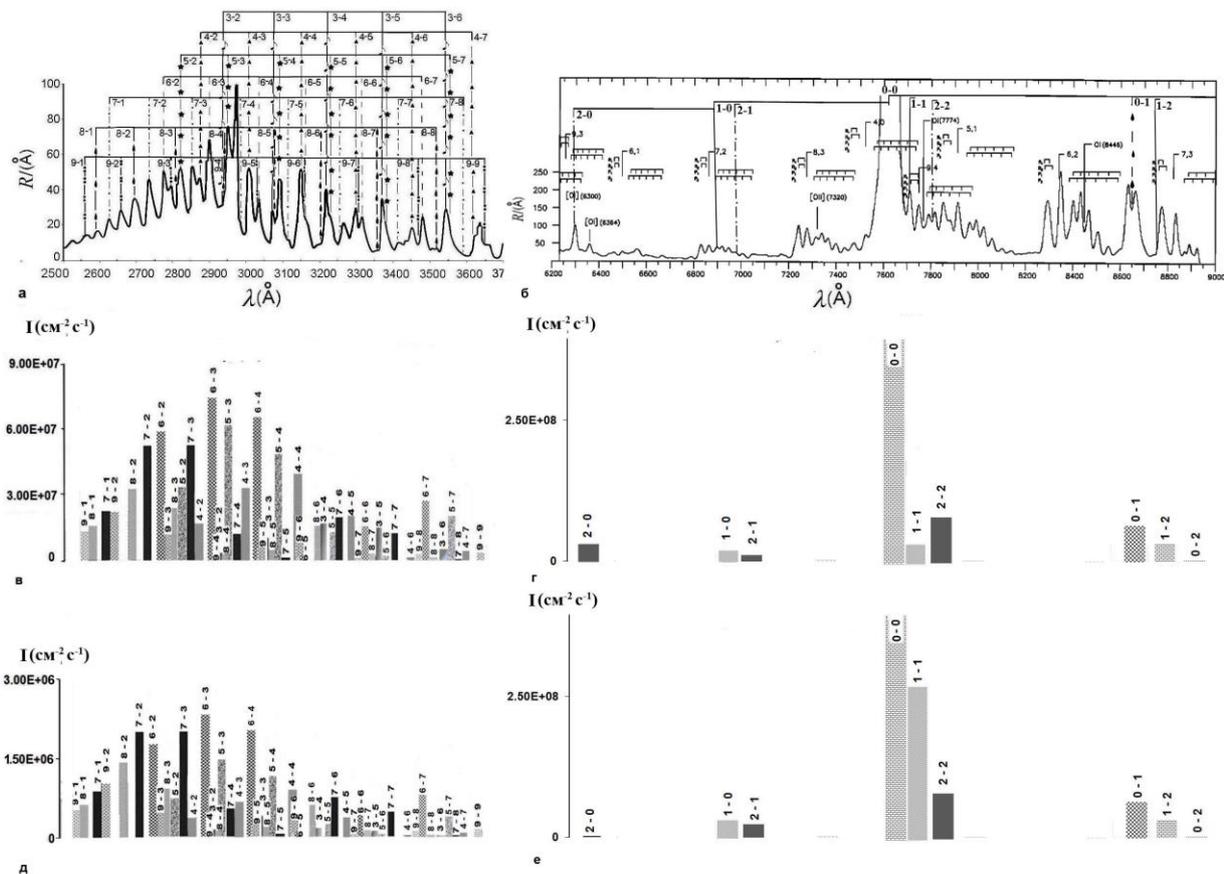


Рисунок 3. Экспериментальные и рассчитанные значения интегральной светимости полос.

На рисунке 3а представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 250–370 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла “Дискавери” (STS-53) [13]. На рисунке 3б – фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 620–900 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла “Индевор” (STS-69) [13]. По осям Y – интенсивности ($R/\text{Å}$), X – длины волн λ (Å), цифры над пиками – ($v'-v''$) при излучательных переходах (3) и (2), соответственно. Рассчитанные значения интенсивности излучения ($I(\text{см}^{-2}\text{с}^{-1})$) (гистограммы) для различных полос Герцберга I, обусловленных переходом (3), для средних широт Земли (55.7° N) для 1 месяца 1980 и 1981 гг. (рисунок 3в), а также для системы Атмосферных полос, обусловленных переходом (2), для средних широт Земли (55.7° N) для 10 месяцев года, 1976 и 1986 гг. (рисунок 3г), выполнены в этом же диапазоне длин волн. Как видно из сравнения теоретически рассчитанных значений интенсивностей свечения для Земли с экспериментальными данными, наблюдается хорошая корреляция результатов расчета с экспериментом. Аналогично на рисунке 3(д,е) представлены рассчитанные значения интенсивностей излучения для атмосферы Марса для северных широт (67° N) для точки осеннего равноденствия ($L_s \sim 180^\circ$).

Для условий Марса мы можем видеть изменение относительного вклада колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ в свечение полос Герцберга I (рисунок 3д) и колебательных уровней состояния $b^1\Sigma_g^+$ в свечение Атмосферных полос (рисунок 3е). Так из рисунка видно, что вклад колебательных уровней $v'=5, 6$ уменьшается, а у колебательных уровней $v'=8, 9$ увеличивается. Объясняется это особенностями гашения на молекулах углекислого газа.

4. Заключение

На основании экспериментальных данных по профилям концентрации атомарного кислорода и температуры в атмосфере Земли на средних широтах (55.7° N) проведены расчеты объемных и интегральных интенсивностей свечения полос Герцберга I и Атмосферных полос. Проведено сравнение рассчитанных значений со спектральными измерениями спектрографом с космических шаттлов «Дискавери» (STS-53) и «Индевор» (STS 69). Показано, что наблюдается хорошая корреляция результатов расчета с экспериментальными данными.

Аналогичные расчеты интенсивностей свечения полос Герцберга I и Атмосферных полос проведены для условий Марса для широты 67° . Получено, что для условий Марса наблюдается лишь некоторое соответствие результатов расчета с теми же, указанными выше экспериментальными данными.

Ссылки

1. Barth C.A. Tree-body reaction // *Ann. Géophys.*, Vol. 20, N. 2, P. 182–196. 1964.
2. Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор её структуры и динамики // М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
3. Bates D.R. Oxygen band system transition arrays // *Planet. Space Sci.* V. 37. N. 7. P. 881–887. 1989.
4. Gagne M.-E., Melo S.M.L., Lefevre F., et al. Modeled O₂ airglow distributions in the Martian atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 117. E06005. 2012.
5. Fedorova A.A., Lefevre F., Guslyakova S., Korablev O., Bertaux J.-L., Montmessin F., Reberac A., Gondet B. The O₂ nightglow in the martian atmosphere by SPICAM onboard of Mars-Express // *Icarus.* V. 219. № 2. P. 596–608. 2012.
6. Krasnopolsky V.A. Excitation of the oxygen nightglow on the terrestrial planets // *Planet. Space Sci.* V. 59. № 8. P. 754–756. 2011.
7. 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 // *Изв. РАН. Сер. физическая.* Т. 85. № 3. С. 310–314. 2021.
8. Антоненко О.В., Кириллов А.С. Моделирование интенсивности свечения полос Чемберлена и Герцберга I в ночном небе Земли и сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными // *Геомагнетизм и аэронавигация.* Т.62. № 5. С. 661–670. 2022.
9. Kirillov A.S. Electronic kinetics of main atmospheric components in high-latitude lower thermosphere and mesosphere // *Ann. Geophys.* V. 28. № 1. P. 181–192. 2010.
10. Kirillov A.S. The calculation of quenching rate coefficients of O₂ Herzberg states in collisions with CO₂, CO, N₂, O₂ molecules // *Chem. Phys. Lett.* V. 592. P. 103–108. 2014.
11. Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н. Дезактивация колебательных состояний молекул гидроксила атомарным и молекулярным кислородом в области мезопаузы // *Геомагнетизм и аэронавигация.* Т. 38. № 6. С.642–645. 1998.
12. Семенов А.И., Перцев Н.Н., Шефов Н.Н. и др. Расчет высотных профилей температуры и концентрации атмосферы на 30–110 км // *Геомагнетизм и аэронавигация.* Т. 44. № 6. С. 835–840. 2004.
13. Broadfoot A.L., Bellaire P.J., Jr. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow // *J. Geophys. Res.* V. 104. № A8. P. 17127–17138. 1999.