

ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОС В СПЕКТРЕ НОЧНОГО СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕР ЗЕМЛИ И МАРСА В СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

О.В. Антоненко, А.С. Кириллов

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

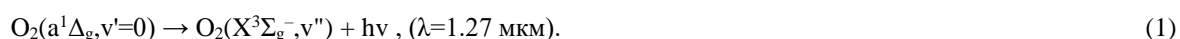
Аннотация

В настоящей работе рассматриваются особенности излучения Атмосферных полос молекулярного кислорода в ночных атмосферах Земли и Марса. Расчитаны значения интегральной светимости Атмосферных полос для средних широт Земли (55.7° с.ш.), для экваториальной зоны, включая северные тропики (23° с.ш.), а также в атмосфере Марса для 67° с.ш. для условий осеннего (Ls~180°) равноденствия. Значения сравниваются с результатами наземных измерений, выполненных спектрографом высокого разрешения (HIRES) на телескопе Кекс I в обсерватории Кека. Показано, что наблюдается хорошее согласие теоретических расчётов с экспериментальными данными для рассмотренных широт Земли. Обсуждается, что расхождение результатов теоретических расчетов для атмосферы Марса со значениями по данным наземных измерений может объясняться особенностями гашения состояния $b^1\Sigma_g^+$ молекулами N_2 и CO_2 .

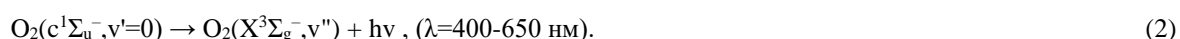
Ключевые слова: экспериментальные данные, эмиссии возбуждённого молекулярного кислорода, Атмосферные полосы, расчёты интегральных интенсивностей полос, спектрографы, обсерватория.

1. Введение

Экспериментальные исследования дневного свечения атмосферы Марса начались в ходе пролетов космических летательных аппаратов (КЛА) «Mariner-6» и «Mariner-7» [1]. Измерения ультрафиолетового спектра свечения показало наличие полос электронно-возбужденной молекулы угарного газа CO и иона молекулы углекислого газа CO_2^+ [1]. В дальнейшем с помощью измерений на КЛА «Mars Express» были открыты ультрафиолетовые авроральные свечения в атмосфере Марса [2], которые аналогично были связаны с полосами CO и CO_2^+ . Регистрация свечения ночного неба атмосферы Марса на КЛА «Mars Express» в основном проходила в инфракрасном диапазоне [3,4]. Измерения проводились для Инфракрасной атмосферной полосы 1.27 мкм, излучаемой при спонтанном переходе



В атмосфере Марса также можно предположить излучение эмиссий O_2^* , включающие системы полос Герцберга II, III и Чемберлена, поскольку они наблюдаются на Венере [5]. Сходство между составом атмосфер Венеры и Марса на высоте максимума свечения O_2^* (показано в таблице 1) позволяет предположить, что излучение этих эмиссий может быть и в марсианской атмосфере, несмотря на то, что долгое время они не были зарегистрированы. В 2024 г. были опубликованы результаты измерений ночного свечения атмосферы Марса, полученные на КЛА «Trace Gas Orbiter» в видимом диапазоне [6]. Как было показано авторами, регистрируемый спектр совпадает с измерениями в ночной атмосфере Венеры, выполненными на КЛА «Венера-9» и «Венера-10» [7] и «Venus Express» [8], и связан он со свечением в видимом диапазоне полос Герцберга II молекулярного кислорода, излучаемых при спонтанных переходах с нулевого колебательного уровня синглетного состояния Герцберга



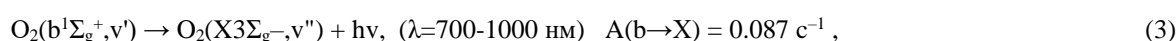
В атмосфере Земли образование атомарного кислорода за счет процесса диссоциации молекулярного кислорода O_2 солнечным ультрафиолетовым излучением происходит на высотах выше 80 км, в атмосфере Марса идет образование атомарного кислорода за счет процесса диссоциации углекислого газа CO_2 на высотах выше 40 км. Образование электронно-возбужденного молекулярного кислорода, излучающего эмиссии в различных спектральных диапазонах, происходит в тройных столкновениях с участием двух атомов

кислорода и третьей частицы. В своем возбужденном состоянии молекула кислорода является метастабильной и, соответственно, гораздо более реакционноспособной, чем в основном.

Таблица 1. Состав атмосфер Венеры ($z = 95$ км) и Марса ($z = 50$ км).

	Венера	Марс
T(K)	150	180
CO ₂	$1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$
O	$2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$

В настоящей работе представлены результаты теоретических расчетов интенсивностей полос, излучаемых в ночном небе атмосфер Земли и Марса при спонтанных переходах с электронно-возбужденного состояния $b^1\Sigma_g^+$



причем у системы (3) наиболее интенсивные полосы располагаются в ИК области. В уравнении (3) $A(b \rightarrow X)$ – характерные вероятности переходов (коэффициенты Эйнштейна) для системы Атмосферных полос.

Цель данной работы – сравнение теоретически рассчитанных интенсивностей свечения Атмосферных полос (3), выполненных как для атмосферы Земли, так и для атмосферы Марса, с аналогичными результатами наземных измерений (пик Мауна-Кеа, Гавайя, 19° с.ш.) [9].

2. Профили концентраций атомарного кислорода в атмосферах Земли и Марса

Для атмосферы Земли экспериментальные данные о характерных концентрациях [O] на средних широтах (55.7° с.ш.) представлены на рисунке 1а для различных месяцев года (1 - января, 4 - апреля, 7 - июля, 10 - октября) в условиях низкой ($F_{10.7}=75$, 1976 и 1986 г.г.) солнечной активности [10]. Для сравнения на рисунке 1а также приведены концентрации [O], полученные согласно атмосферной модели NRLMSISE-00 для условий, описанных выше. Экспериментальные данные о характерных концентрациях [O] в области экватора и на северных тропиках (23.5° с.ш.) Земли (зимний, весенний, летний и осенний сезоны 1995 г.) [11] представлены на рисунке 1б. Также на рисунке 1б для сравнения приводятся данные, полученные согласно атмосферной модели NRLMSISE-00 для тех же условий.

Как видно из рисунков 1а и 1б, данные согласно модели NRLMSISE-00 расходятся с экспериментальными значениями, и они в расчетах не используются. Для профилей температур использовались данные многолетних (1960–2000 г.г.) измерений на высотах 30–110 км [10]. Для профилей концентраций N₂, O₂ использовались данные из модели MSIS-90.

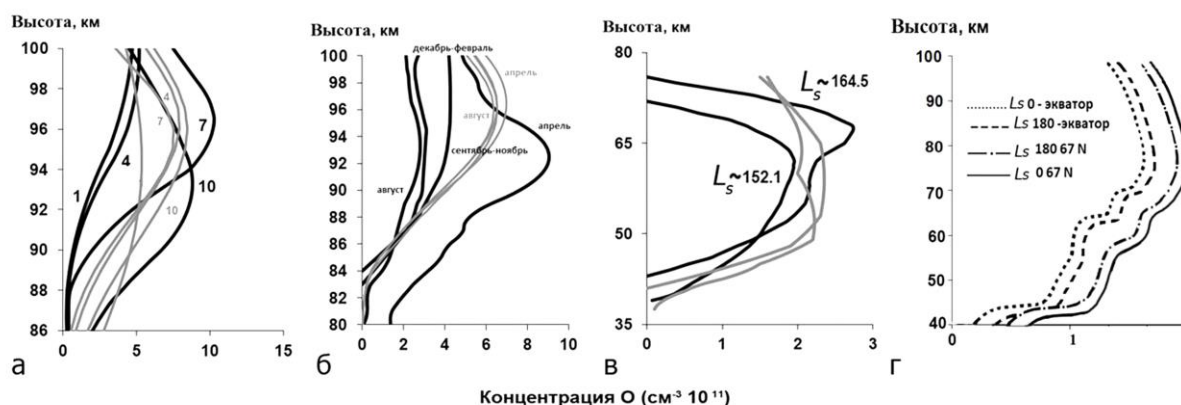


Рисунок 1. Профили концентраций атомарного кислорода для атмосферы Земли (а,б) и атмосферы Марса (в,г). а: темные линии – данные [10], светлые линии – данные NRLMSISE-00. б: темные линии – данные [11], светлые линии – данные NRLMSISE-00. в: темные линии – данные [3], светлые линии – данные LMD-MGCM. г: данные LMD-MGCM.

На рисунке 1в показаны высотные профили [O] для атмосферы Марса, полученные с ИК-спектрометра SPICAM для орбит $L_s=152.1^\circ$, $L_s=164.5^\circ$ (месяц февраль, 82° ю.ш.) [3] и полученные из модели общей циркуляции французской лаборатории LMD-MGCM для тех же условий (светлые линии). Модель довольно хорошо воспроизводит эмиссионный слой $O_2(a^1\Delta_g)$, наблюдаемый SPICAM. Значения концентрации O в 1.3 раза ниже модельных значений на высотах 50–60 км. Наблюдения подтверждают сильные вариации содержания кислорода на этих высотах [3]. Поэтому для атмосферы Марса в расчетах используются профили концентраций атомарного кислорода, полученные из модели LMD-MGCM, представленные на рисунке 1г для широт экватора и для 67° с.ш. Марса, причем для условий весеннего ($L_s \sim 0^\circ$) и осеннего ($L_s \sim 180^\circ$) равноденствий. Для профилей концентраций CO_2 и температур использовались данные согласно модели LMD-MGCM [12].

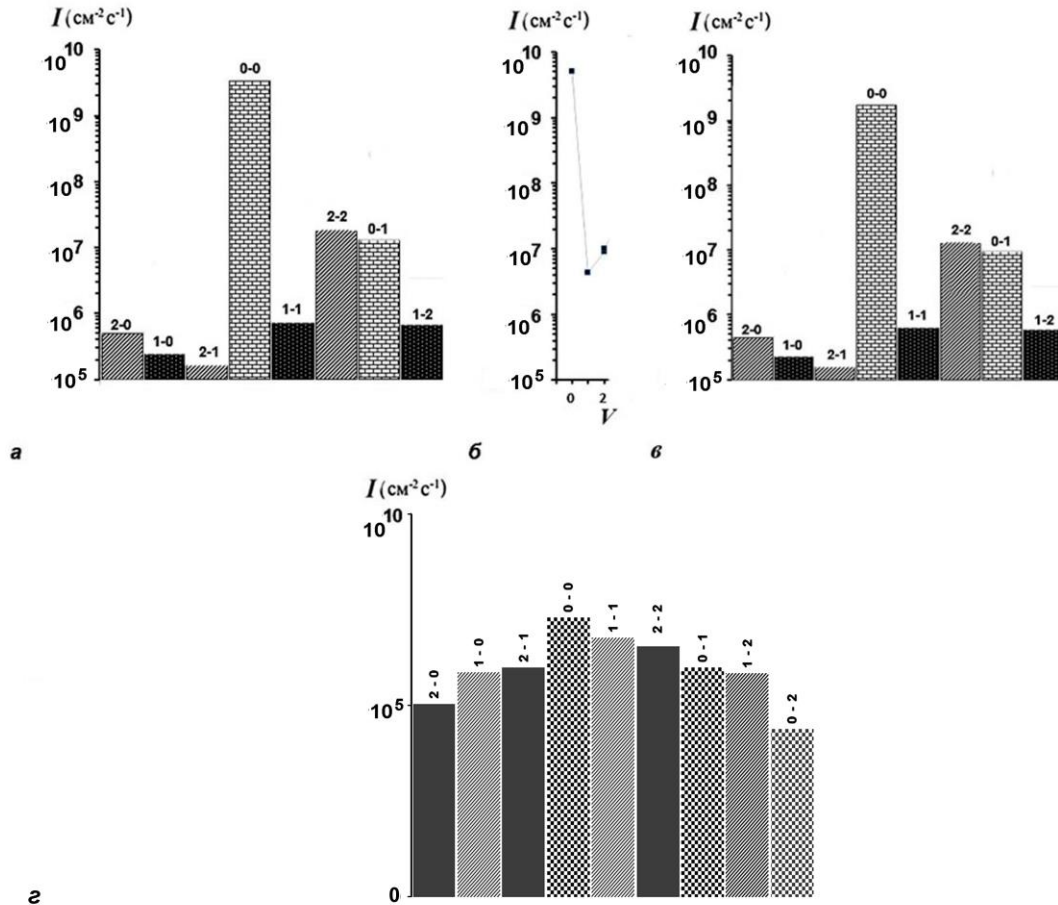


Рисунок 2. Рассчитанные значения интегральной светимости Атмосферных полос. а: для средних широт Земли. б: экспериментальные данные. в: для экваториальных широт Земли. г: для атмосферы Марса.

3. Сравнение рассчитанных интенсивностей свечения Атмосферных полос, выполненных для атмосферы Земли и атмосферы Марса, с аналогичными результатами наземных измерений (пик Мауна-Кеа, Гавайя, 19° с.ш.)

В настоящей работе на рисунке 2 представлены рассчитанные значения интегральной светимости Атмосферных полос с первых трех колебательных уровней $v'=0-2$ состояния $b^1\Sigma_g^+$. Приведены рассчитанные значения для средних широт Земли (55.7° с.ш.) для 1 месяца 1986 г. (рисунке 2а). Общие интенсивности свечения полос с колебательных уровней $v'=0-2$ состояния $b^1\Sigma_g^+$, полученные спектрографом высокого разрешения (HIRES) на телескопе Кека I (обсерватория Кека, пик Мауна-Кеа, 4145 м, Гавайи, США, 19° с.ш.) [9,13] представлены на рисунке 2б. Автор [13] отмечает, что с того времени, как вышеназванный крупнейший оптический телескоп впервые увидел свет в 1993 г., началась новая эра в исследованиях системы Атмосферных полос молекулярного кислорода O_2 . Измерения с помощью этого телескопа ведутся с 1993 г.,

более точного периода представленных на рисунке измерений не указано, однако, автор описывает наблюдения, ссылаясь на труды 1994 г., 1996 г. [13]. Результаты расчетов для экваториальной зоны, включая северные тропики (23° с.ш.), для зимнего периода 1995 г. показаны на рисунке 2в. Для атмосферы Марса гистограммы для Атмосферных полос были рассчитаны для широты 67° с.ш. при $L_s \sim 180^\circ$ т.е. для осеннего равноденствия (рисунок 2г).

Как видно из сравнения рисунков 2а, 2в и 2г, что для атмосферы Марса происходит изменение относительных населенностей колебательных уровней состояния $b^1\Sigma_g^+$ и их вклада в свечение Атмосферных полос по сравнению с атмосферой Земли. Так населенность колебательного уровня $v'=1$ и $v'=2$ относительно уровня $v'=0$ значительно увеличивается по сравнению с атмосферой Земли. Объясняется это различным характером гашения этого состояния на молекулах N_2 , O_2 и CO_2 [14]. Основное гашение молекулы $O_2(b^1\Sigma_g^+, v'=0)$ в атмосфере Земли происходит на молекулах N_2 , причем константа более чем на два порядка меньше, чем аналогичная константа для столкновений с CO_2 [14].

4. Заключение

Проведены расчеты объемных интенсивностей свечения Атмосферных полос на основании экспериментальных данных по профилям концентрации атомарного кислорода и температуры в атмосфере Земли на средних широтах (55.7° с.ш.) и в экваториальной зоне, включая северные тропики, в атмосфере Марса для широты 67° с.ш. в точке осеннего равноденствия ($L_s=180^\circ$). Рассчитанные значения сравниваются с аналогичными расчетами по данным наземных измерений. 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 со значениями по данным наземных измерений.

Литература

1. Barth C.A., Hord C.W. Pearce J.B., et al. Mariner 6 and 7 ultraviolet spectrometer experiment: Upper atmosphere data // *J. Geophys. Res.* V. 76. № 10. P. 2213-2227. 1971.
2. Bertaux J.-L., Leblanc F., Witasse O., et al. Discovery of an aurora on Mars // *Nature*. V. 435. P. 790-794. 2005.
3. Fedorova A.A., Lefevre F., Guslyakova S., et al. The O_2 nightglow in the martian atmosphere by SPICAM onboard of Mars-Express // *Icarus*. V. 219. № 2. P. 596-608. 2012.
4. Bertaux J.-L., Gondet B., Lefevre F., et al. First detection of O_2 1.27 μm nightglow emission at Mars with OMEGA/MEX and comparison with general circulation model predictions // *J. Geophys. Res.* V. 117. E00J04. 2012.
5. Migliorini A., Altieri F., Zasova G., et al. Oxygen airglow emission on Venus and Mars as seen by VIRTIX/VEX and OMEGA/MEX imaging spectrometers // *Planet. Space Sci.* V. 59. № 10. P. 981-987. 2011.
6. Gérard J.-C., Soret L., Thomas I.R., et al. Observation of the Mars O_2 visible nightglow by the NOMAD spectrometer onboard the Trace Gas Orbiter // *Nature Astronomy*. V. 8. P. 77-81. 2024.
7. Краснопольский В.А., Крысько А.А., Рогачев В.Н., и др. Спектроскопия свечения ночного неба Венеры на АМС «Венера-9» и «Венера-10» // *Космические Исследования*. Т. 14. № 5. С. 789-795. 1976.
8. Migliorini A., Piccioni G., Gérard J.C., Slanger T., Politi R., Snels M., Nuccilli F., and Drossart P. The characteristics of the O_2 Herzberg II and Chamberlain bands observed with VIRTIS Venus Express // *Icarus*. V. 223. № 1. P. 609-614. 2013.
9. Slanger T.G., Cosby P.C., Huestis D.L., et al. Vibrational level distribution of O_2 in the mesosphere and lower thermosphere region // *J. Geophys. Res.* V. 105. № D16. P. 20557-20564. 2000.
10. Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики // М.: ГЕОС. 741 С. 2006.
11. Sheese P.E., McDade I.C., Gattinger R.L., et al. Atomic oxygen densities retrieved from Optical Spectrograph and Infrared Imaging System observations of O_2 A-band airglow emission in the mesosphere and lower thermosphere // *J. Geophys. Res.* V. 116. D01303. 2011.
12. Gagne M.-E., Melo S.M.L., Lefevre F., et al. Modeled O_2 airglow distributions in the Martian atmosphere // *J. Geophys. Res.* V. 117. E06005. 2012.
13. Vogt S. The High Resolution Echelle Spectrometer on the Keck ten-meter telescope // *Opt. Eng.* V. 2198. P. 362-375. 1994.
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.* V. 592. P. 103–108. 2014.