

ОБРАЗОВАНИЕ И ГАШЕНИЕ СОСТОЯНИЙ ГЕРЦБЕРГА МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА НА ВЫСОТАХ СВЕЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

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

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

Аннотация. Обсуждаются принципиальные различия кинетики возбуждения электронных уровней энергии кислородных составляющих в атмосферах планет Земли, Венеры. Показано, что рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга имеют различную зависимость от колебательного номера для рассмотренных случаев. Наблюдается хорошее согласие результатов расчета с результатами наземных наблюдений и спектральными данными, полученными с борта космических летательных аппаратов.

1. Введение

Молекулярный кислород O_2 – это второй по содержанию (после молекулярного азота N_2) из основных газов в атмосфере Земли. В верхней атмосфере Земли эффективно протекает процесс диссоциации молекул O_2 солнечным УФ излучением (фотоны $УФ < 240$ нм)



соответственно, в верхней атмосфере Венеры (фотоны $УФ < 169$ нм) диссоциируют CO_2 :



что приводит к образованию относительно высоких концентраций атомарного кислорода O на высотах более 80 км, с максимумом около 95-100 км на Земле и на высотах ≈ 75 -120 км на Венере.

Таким образом, на высотах свечения ночного неба этих планет создаются высокие концентрации атомарного кислорода O .

Кроме того, при тройных столкновениях в атмосферах планет земной группы



с участием атома и молекулы кислорода (где M – это третья частица при столкновении) образуется озон O_3 .

На высотах стратосферы Земли озон находится в достаточном количестве, чтобы защитить живые организмы от пагубного воздействия ультрафиолетового излучения Солнца: $УФ-Б$ (280-315 нм).

Индикатором наличия кислорода в атмосфере планет являются свечение различных полос у молекулы O_2 . На рис. 1 приведена схема трёх электронно-возбужденных состояний Герцберга ($c^1\Sigma_u^-$, $A'^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$), двух синглетных состояний ($a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$), и основного $X^3\Sigma_g^-$ состояния молекулы O_2 , а также указаны названия систем полос, излучаемых при спонтанных переходах между различными состояниями, каждое из которых находится ниже диссоциационного предела молекулы O_2 (~ 41300 $см^{-1}$, 8065 $см^{-1} = 1$ эВ).

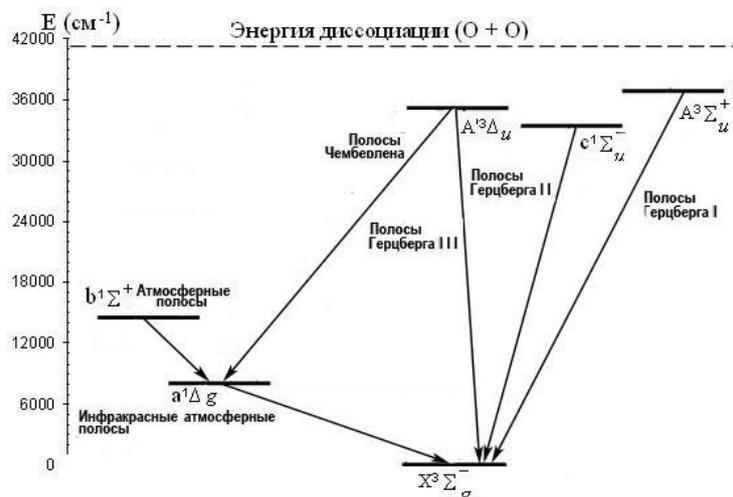


Рисунок 1. Электронные переходы внутри молекулы O_2 .

Цель данной работы – представить результаты экспериментальных и теоретических исследований свечения молекулярного кислорода O_2 в атмосферах планет земной группы, а также рассмотреть принципиальные различия кинетики возбуждения электронных уровней энергии кислородных составляющих в атмосферах планет земной группы.

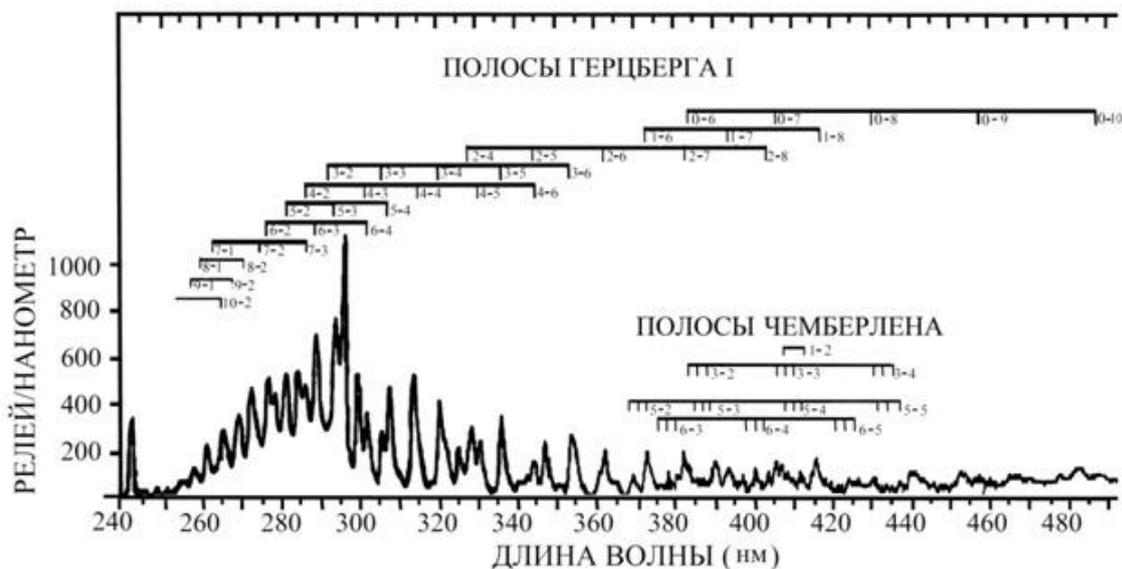


Рисунок 2. Спектр свечения ночного неба Земли в диапазоне 240-440 нм (2400-4400 Å) [2].

2. Свечение планет ночного неба земной группы

Наиболее четко свечение молекулярного кислорода прослеживается в спектрах свечения ночного неба Земли [1]. Еще в начале 60-х годов прошлого века сотрудниками ИФА РАН Красовским В.И. и Шефовым Н.Н. были опубликованы спектры, где четко было показано присутствие полос Герцберга I ($A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-, v'=1-13$) в диапазоне 300-450 нм. Дальнейшие измерения спектров ночного неба американскими исследователями [2] также указали на интенсивное свечение полос Чемберлена ($A^3\Delta_u, v=0 \rightarrow a^1\Delta_g, v'=4-8$) (рис. 2).

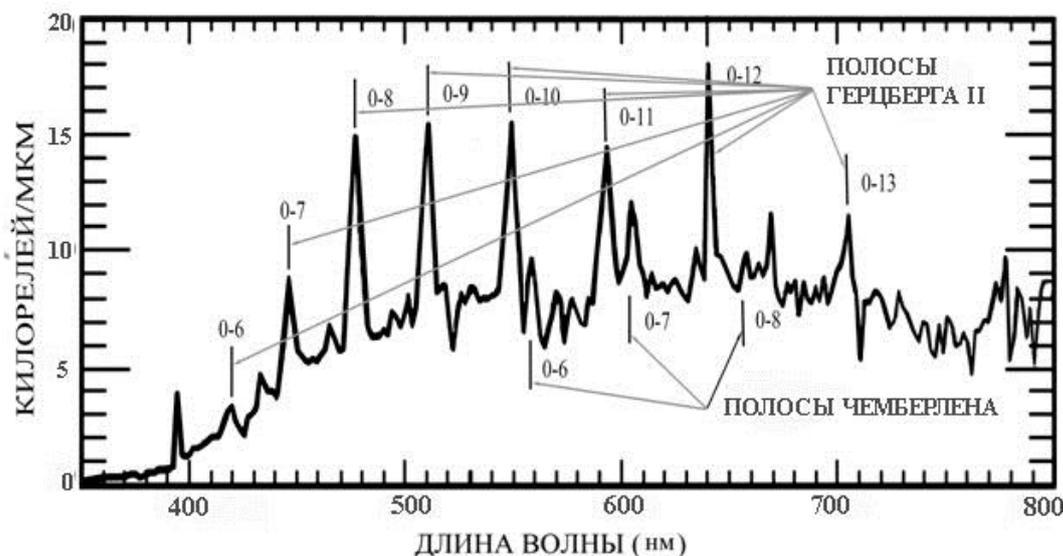


Рисунок 3. Спектр свечения ночного неба Венеры с орбитального космического аппарата Venus-Express [8].

Спектры ночного свечения атмосферы Венеры, полученные с помощью инфракрасных спектрометров VIRTIS и SPICAV/SOIR, установленных на аппарате космического Агенства «Венера-Экспресс», исследователям, участвовавшим в разработке этих приборов и подготовке экспериментов с ними, представилась возможность более детально изучить свечение молекул кислорода на ночной стороне Венеры.

В 2013 г. *Migliorini et al.* [2013] опубликовали спектр свечения Венеры, полученный с орбитального космического аппарата Venus-Express, оснащённого спектрографом VIRTIS (рис. 3)

Эти авторы показали, что кроме полос Герцберга II ($c^1\Sigma_u^-, v=0 \rightarrow X^3\Sigma_g^-, v'=3-13$) в спектре свечения ночного неба в атмосфере Венеры имеются также полосы Чемберлена. Причем на Венере эти переходы происходят только с нулевых уровней на ненулевые уровни нижележащих состояний.

Таким образом, в результате наблюдений спектров полос молекулярного кислорода в свечении ночного неба Земли и Венеры было обнаружено их принципиальное различие: широкий спектр полос Герцберга I и Чемберлена, в атмосфере Земли (рис. 2) и система полос Герцберга II, с незначительным вкладом полос Чемберлена (рис. 3), причём в ночной атмосфере Земли переходы осуществляются с ненулевых колебательных уровней состояний $A^3\Sigma_u^+$, ($v=6$) и $A^3\Delta_u$, ($v=6-7$) в ночной атмосфере Венеры переходы осуществляются с нулевого колебательного уровня состояний $c^1\Sigma_u^-, (v=0)$, и $A^3\Delta_u, (v=0)$.

3. Результаты моделирования колебательной населенности в атмосферах Земли и Венеры

На рис. 4 приведены рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга молекулы кислорода ($c^1\Sigma_u^-, A^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+$) на высоте 95 км в атмосфере Земли. Аналогичные результаты расчётов для высоты 100 км в атмосфере Венеры также приведены на рис. 4.

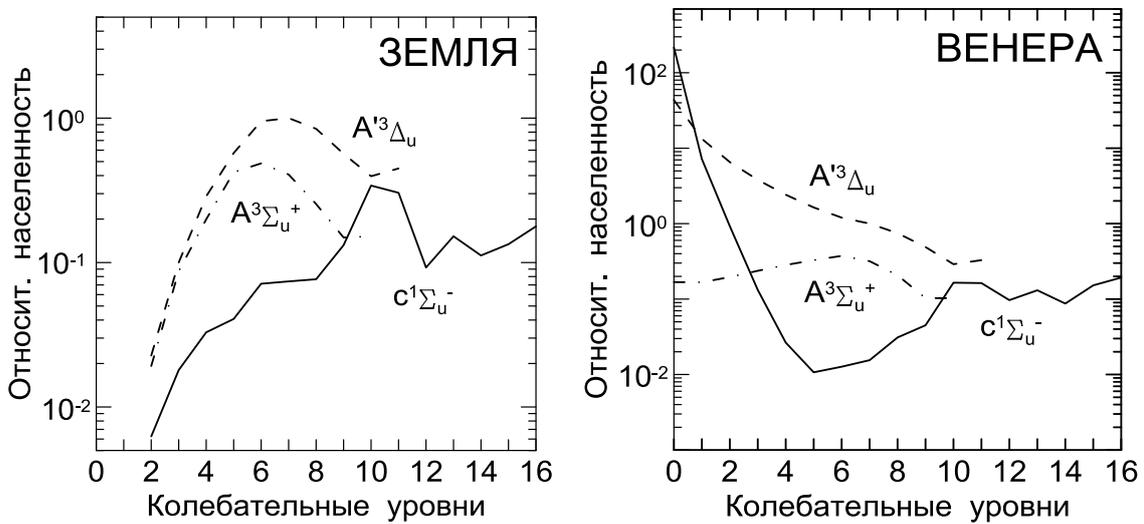
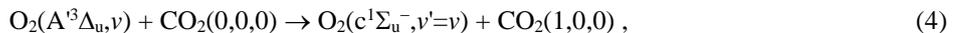


Рисунок 4. Рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга ($c^1\Sigma_u^-, A^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+$) на высоте 95 км в атмосфере Земли и на высоте 100 км в атмосфере Венеры.

Как было показано в [9], запрещенный по спину процесс



когда молекула кислорода переходит из $A^3\Delta_u$ в $c^1\Sigma_u^-$ состояние, а в молекуле CO_2 происходит возбуждение симметричной колебательной моды, ускоряет процесс переноса энергии. Поэтому в дополнение к разрешенным по спину процессам гашения состояния был учтен процесс (4).

Таким образом, как показали результаты расчетов (см. рис. 4), для случая атмосферы Земли максимум относительной населённости триплетных состояний Герцберга в ночной атмосфере приходится на 6-8 колебательные уровни. Поэтому в спектре свечения ночного неба Земли наблюдаются различные полосы, обусловленные излучательными переходами с этих и близлежащих колебательных уровней состояний $A^3\Sigma_u^+$ и $A^3\Delta_u$ (рис. 1). Для атмосферы Венеры, где доминирует двуокись углерода, расчеты показали, что столкновительные процессы приводят к аккумуляции энергии на нулевых колебательных уровнях состояний $c^1\Sigma_u^-$ и $A^3\Delta_u$. Поэтому при спектральных наблюдениях с космических летательных аппаратов [6, 7, 8] наблюдались полосы Герцберга II и Чемберлена, обусловленные спонтанными переходами с нулевых колебательных уровней указанных состояний.

5. Заключение

Обнаружено принципиальное различие спектров полос молекулярного кислорода в свечении ночного неба Земли и Венеры: широкий спектр полос Герцберга I и Чемберлена в свечении атмосферы Земли, система полос Герцберга II, с незначительным вкладом полос Чемберлена в атмосфере Венеры. Показано, что

рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга имеют различную зависимость от колебательного номера для рассмотренных случаев:

- максимум относительной населённости состояний Герцберга в ночной атмосфере Земли приходится на 5-7 (Герцберг 1), 6-8 (Герцберг 3) колебательные уровни.
- аккумуляция энергии на нулевых колебательных уровнях состояний $c^1\Sigma_u^-$ и $A^3\Delta_u$ в ночной атмосфере Венеры.

Благодарности. Работа выполнена в рамках программы Президиума РАН № 28 “Космос: исследование фундаментальных процессов и их взаимосвязей”.

Литература

1. Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.I. Atlas of the airglow spectrum 3000-12400 Å. // Planetary and Space Science, 1962, v.9, №12, p.883-915.
2. 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.
3. Krasnopolsky V.A. Venus night airglow: Ground-based detection of OH, observations of O₂ emissions, and photochemical model. // Icarus, 2010, v.207, №1, p.17-27.
4. Krasnopolsky V.A. Solar activity variations of thermospheric temperatures on Mars and a problem of CO in the lower atmosphere. // Icarus, 2010, v.207, №2, p.638-647.
5. Rodrigo R., Lopez-Moreno J.J., Lopez-Puertas M., Moreno F., Molina A. Neutral atmospheric composition between 60 and 220 km: A theoretical model for mid-latitudes. // Planetary and Space Science, 1986, v.34, №8, p.723-743.
6. Краснопольский В.А., Крысько А.А., Рогачев В.Н., Паршев В.А. Спектроскопия ночного свечения Венеры на АМС Венера-9 и Венера-10. // Космические исследования, 1976, т.14, №5, с.789-795.
7. Slanger T.G., Black G. The O₂(C³Δ_u→a¹Δ_g) bands in the nightglow spectrum of Venus. // Geophysical Research Letters, 1978, v.5, №11, p.947-948.
8. Migliorini A., Piccioni G., Gerard J.C., Soret L., Slanger T.G., Politi R., Snels M., Drossart P., Nuccilli F. The characteristics of the O₂ Herzberg II and Chamberlain bands observed with VIRTIS/Venus Express. // Icarus, 2013, v.223, №1, p.609-614.
9. Кириллов А.С. Моделирование населенностей колебательных уровней состояний молекулярного кислорода, исходных для полос Герцберга, на высотах нижней термосферы и мезосферы. // Геомагнетизм и Аэронавигация, 2012, т.52, №2, с.258-264.
10. Kirillov A.S. The calculation of quenching rate coefficients of O₂ Herzberg states in collisions with CO₂, CO, N₂, O₂ molecules. // Chemical Physics Letters, 2014, v. 592, p.103-108.