

## ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ $O_2^*$ В СПЕКТРЕ 400 – 650 НМ В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ГАЗОВ

О.В. Антоненко, А.С. Кириллов

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

### Аннотация

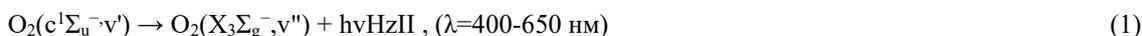
В настоящей работе представлены рассчитанные значения интегральной светимости полос Герцберга II, спектра свечения 400-650 нм, для условий Земли, Венеры, Марса – планет с различной концентрацией  $CO_2$ . Обсуждается корреляция результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения возбужденного молекулярного кислорода с экспериментальными данными по ночному свечению  $O_2$ , полученными в национальной обсерватории Китт-Пик (США), с космических летательных аппаратов Европейского Космического агентства Venus Express и Trace Gas Orbiter, соответственно, для Венеры и Марса. Обсуждаются также особенности гашения молекулярного кислорода в условиях планет с преобладающей концентрацией  $CO_2$  (Марс, Венера). Наблюдается, что свечение полос Герцберга II на Земле значительно слабее, чем на Венере и на Марсе, что объясняется слабой концентрацией  $CO_2$  по сравнению с концентрацией  $CO_2$  на планетах земной группы.

**Ключевые слова:** интенсивности свечения, полосы излучения, космические летательные аппараты, национальная обсерватория, расчёты интегральных интенсивностей полос, высотные распределения атомарного кислорода, колебательные уровни, возбуждённый молекулярный кислород.

### 1. Введение

В настоящее время атмосфера Земли состоит в основном из двухатомных гомоядерных молекул  $N_2$  и  $O_2$ . В процессе эволюции атмосфера Земли значительно растеряла газ  $CO_2$ , который растворился в океане и образовал карбонаты. Марс растерял воду, т.к его масса слишком мала (примерно в 10 раз меньше земной), чтобы удержать плотную атмосферу, которая необходима для существования воды в жидком виде на поверхности. Сейчас на Марсе разреженная атмосфера с доминированием  $CO_2$  (~95%) и небольшой концентрацией  $N_2$  (~2.7%). Венера — пример катастрофического парникового эффекта. Её размеры и масса почти идентичны земным, но её эволюция пошла по совершенно иному пути. Изначально на Венере могло быть столько же воды, сколько и на Земле. Однако её близость к Солнцу привела к сильному нагреву и, соответственно, испарению водных масс. Венера потеряла воду из-за фотодиссоциации  $H_2O$  и утечки водорода в космос. Современная атмосфера Венеры – сверхплотный коктейль из  $CO_2$  (~95%) с примесями  $SO_2$ , что создает сильное давление у поверхности и кислотные облака [1].

Спектральные измерения свечения  $O_2$  в полосах Герцберга II ( $H\alpha II$ )



первоначально были идентифицированы в лабораторном спектре. В ходе эксперимента было показано, что обычный спектр свечения  $O_2$ , в котором доминирует эмиссия Герцберг I, преобразовался в Герцберг II при добавлении  $CO_2$ , таким образом имитируя атмосферу Венеры. Позже полосы Герцберга II были идентифицированы в ночной атмосфере Венеры на космических летательных аппаратах (КЛА) Венера-9 и Венера-10. В ночном свечении этой планеты излучение Герцберга II намного сильнее, чем объединенное УФ и видимое излучение  $O_2$  в земном [2], как показано на рисунке 1.

Наблюдения с помощью спектрографа VIRTIS на борту КЛА Venus-Express позволили повторно обнаружить систему полос Герцберга II в свечении ночного неба Венеры. Полосы (0-6), (0-7), (0-8), (0-9), (0-10) и (0-11) наблюдались в лимбе и достигали максимума свечения примерно на 95 км. Общая интегральная интенсивность свечения полос Герцберга II, обусловленных излучательными переходами (1) на колебательные уровни  $v'' = 6-11$ , составляла в лимбе 200 кР [3].

В ночном свечении атмосферы Марса система полос Герцберга II впервые была обнаружена при помощи спектрометра NOMAD, на борту КЛА Trace Gas Orbiter. Наблюдения велись в период с марта 2020 года по октябрь 2022 года. Структура полос Герцберга II с переходами (1) на колебательные уровни  $v'' = 5-12$  четко проявлялась в спектрах между 400 и 600 нм. За пределами 620 нм уровень шума увеличивается, что делает

обнаружение полосы  $v'' = 12$  неопределенным. Общая интегральная интенсивность свечения полос с  $v'' = 5-12$  составляла  $108 \pm 11$  кР [4].

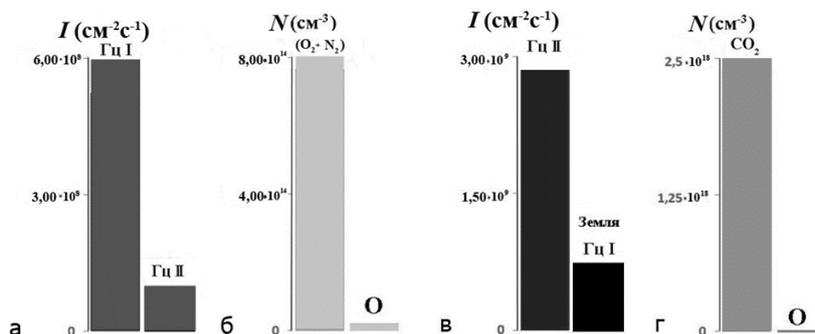


Рисунок 1. Интенсивность эмиссий Герцберга II на Земле и Венере.

Как показали результаты спектральных измерений на КЛА [3,4], в атмосферах Венеры и Марса, где преобладает  $CO_2$ , энергия электронного возбуждения у молекулы кислорода аккумулируется на нулевом колебательном уровне состояния  $s^1\Sigma_g^-$ . Спонтанные переходы с  $s^1\Sigma_u^-, v''=0$  на колебательные уровни основного состояния  $X_3\Sigma_g^-$  приводят к свечению полос Герцберга II. В атмосфере Земли, где преобладают составляющие  $O_2$  и  $N_2$ , энергия электронного возбуждения у молекул кислорода аккумулируется на различных ненулевых уровнях состояний Герцберга.

Цель настоящей работы — сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения полос Герцберга II с экспериментальными данными об интенсивности ночного свечения молекулярного кислорода  $O_2^*$  в излучении верхних атмосфер планет земной группы.

## 2. Данные о характерных концентрациях атомарного кислорода для планет земной группы

В настоящей работе для атмосферы Земли используются экспериментальные данные о характерных концентрациях [O] на высотах выше 80 км на основании характеристик свечения атомарного кислорода O для осеннего сезона в условиях низкой солнечной активности на северных тропиках ( $23,5^\circ$  с.ш.) Земли [5]. Распределение плотностей  $O_2$  и  $N_2$  используются в расчетах согласно атмосферной модели NRLMSISE-00 для описанных выше условий.

Высотные профили [O] для атмосферы Марса, получены из модели общей циркуляции французской лаборатории LMD-MGCM, для  $67^\circ$  с.ш. Марса, осеннего ( $L_s \approx 180^\circ$ ) равноденствия. Для профилей концентраций  $CO_2$  и температур также использовались данные из модели LMD-MGCM [6]. Обнаружение видимых полос Герцберга II в дневном свечении Марса делает его измерение перспективным методом для получения плотности атомарного кислорода и ее изменений в средней атмосфере [4].

К данным, полученным со спектрографа VIRTIS из измерений Venus Express в атмосфере Венеры, была применена одномерная модель Миллса [1]. Модель рассматривает распределение плотности  $CO_2$  и O, полученные с VIRTIS. Результаты обнадеживают, поскольку модель позволяет хорошо воспроизводить наблюдения VIRTIS как в видимом, так и в ИК-диапазонах спектра. В настоящее время модель Миллса является основной справочной для фотохимии Венеры [1], поэтому в расчетах используются профили концентраций атомарного кислорода и углекислого газа, а также профили температур из модели Миллса.

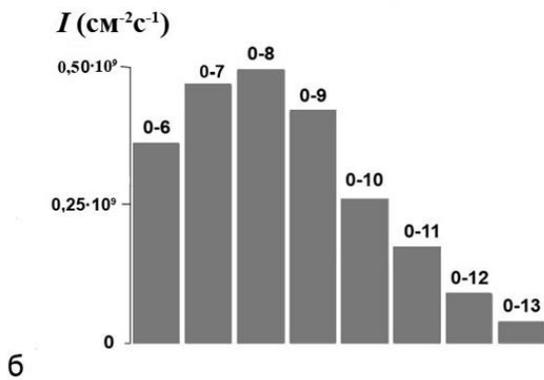
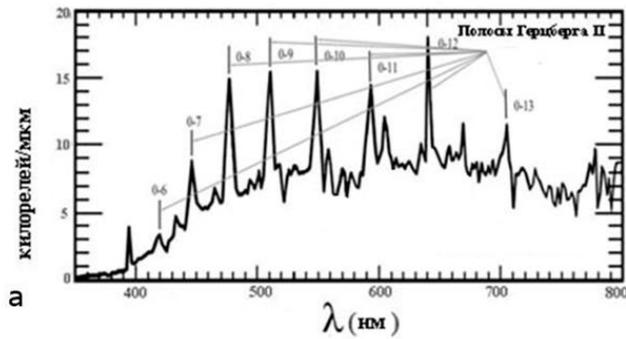
## 3. Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными как наземными измерениями, так и с космических аппаратов

На рис.2а представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба Венеры в диапазоне 400–700 нм, измеренного спектрографом с космического аппарата Venus-Express [3]. Общая интенсивность свечения в надире для рассматриваемых полос Герцберга II составляет порядка 2700 Р ( $2,7 \cdot 10^9$  фотон  $\cdot \text{cm}^{-2}\text{c}^{-1}$ ) [1]. Значения интенсивности излучения  $Iv'v''$  ( $\text{cm}^{-2}\text{c}^{-1}$ ) (гистограммы) для полос Герцберга II, были рассчитаны согласно концентрациям составляющих атмосферы Венеры. Результаты расчетов для интегральных интенсивностей восьми полос Герцберга II для переходов (1) также представлены на рис.2б.

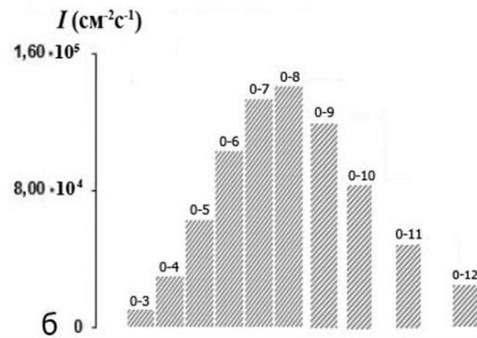
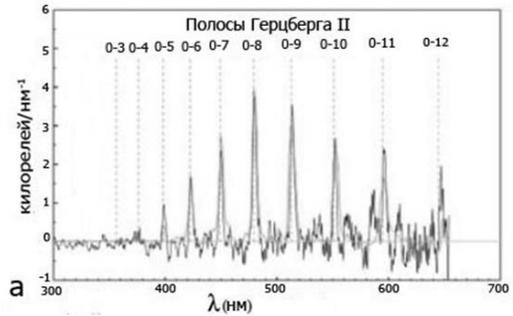
При расчёте интенсивностей излучения  $Iv'v''$  используется приближение оптически тонкого слоя, т.е. пренебрегается поглощением фотонов внутри слоя.

На рис.3а представлен фрагмент спектра в лимбе свечения ночной атмосферы Марса в диапазоне 350–650 нм, измеренного спектрографом с КЛА Trace Gas Orbiter. Для атмосферы Марса гистограммы интенсивностей свечения для полос Герцберга II были рассчитаны для  $67^\circ$  с.ш. при  $L_s \approx 180^\circ$  т.е. для осеннего равноденствия. Также, как и в случае с атмосферой Венеры, коэффициент тройных столкновений  $k$  полагался равным  $1,2 \cdot 10^{-32} (300/T)^2 \text{ cm}^6\text{c}^{-1}$ , где высотный профиль температуры  $T$  брался согласно [7]. Данное предположение

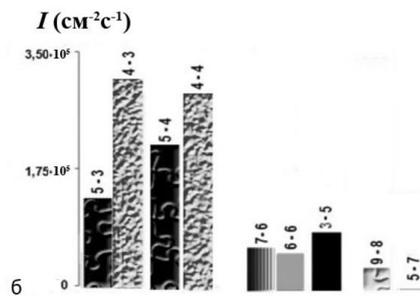
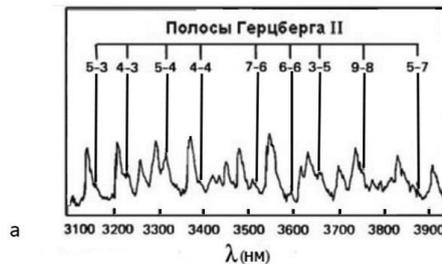
основано на том, что в атмосферах Венеры и Марса доминирующим атмосферным газом является углекислый газ CO<sub>2</sub>. На рис.3б представлены результаты расчетов интенсивностей десяти полос ( $v'=0 \rightarrow v''=3-12$ ). Общая интенсивность рассмотренных полос составила 280 Р.



**Рисунок 2.** а) Фрагмент спектра свечения Венеры. б) Рассчитанные значения  $Iv'v''$  ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) для полос Герцберга II в атмосфере Венеры.



**Рисунок 3.** а) Фрагмент спектра свечения Марса. б) Рассчитанные значения  $Iv'v''$  ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) для полос Герцберга II в атмосфере Марса.



**Рисунок 4.** а) Фрагмент спектра свечения Земли. б) Рассчитанные значения  $Iv'v''$  ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) для полос Герцберга II в атмосфере Земли.

На рис.4а представлены результаты спектрального анализа [8,9] наземных измерений для ночной атмосферы Земли, измеренные спектрографом из национальной обсерватории Китт–Пик, Аризона 32° с.ш. на высоте 2080 м [10]. Как видно из рис.4а, в спектре свечения ночного неба Земли присутствуют много полос Герцберга II, связанных со спонтанными излучательными переходами (1) с высоких колебательных уровней  $v^1 > 0$  состояния  $c^1\Sigma_u^-$ . Результаты расчета для соответствующих полос Герцберга II показаны на рис.4б. Гистограммы для полос Герцберга II (рис.4б) были рассчитаны для северных тропиков (23.5° с.ш.) Земли для осеннего сезона.

#### 4. Заключение

В работе проведено сравнение рассчитанных значений интегральной светимости полос Герцберга II для атмосферы Земли с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 310–390 нм, из национальной обсерватории Китт-Пик [10]. Сравнение показало удовлетворительные результаты. В ночных атмосферах планет земной группы Венеры и Марса, где преобладает углекислый газ  $CO_2$ , на КЛИА регистрируются полосы Герцберга II, обусловленные излучательными переходами с нулевого колебательного уровня  $v^1=0$  состояния  $c^1\Sigma_u^-$  на различные уровни нижележащего  $X^3\Sigma_g^-$  состояния [3,4]. В условиях ночной атмосферы Земли свечение полос Герцберга II связано с излучательными переходами с ненулевых колебательных уровней состояния  $c^1\Sigma_u^-$  на основное состояние  $O_2$ . Проведено сопоставление рассчитанных значений интегральной светимости полос Герцберга II для атмосфер Венеры и Марса с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 350–700 нм на КЛИА Venus-Express [3] и Trace Gas Orbiter [4]. Показано, что наблюдается хорошее согласие расчетов с экспериментальными данными.

#### Литература

1. Krasnopolsky V.A. Atmospheric chemistry on Venus, Earth, and Mars: Main features and comparison // Planet. Space Sci. 2011. V. 59. N 10. P. 952–964.
2. Краснопольский В.А., Крысько А.А., Рогачев В.Н. и др. Спектроскопия свечения ночного неба Венеры на АМС «Венера-9» и «Венера-10» // Косм. исслед. 1976. Т. 14. № 5. С. 789–795.
3. 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. 2011. V. 59. Iss. 10. P. 981–987.
4. 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. 2024. V. 8. P. 77–81.
5. 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. 2011. V. 116. Art.ID. D01303.
6. Антоненко О.В., Кириллов А.С. Исследования влияния сезонных и широтных вариаций атомарного кислорода на интенсивность собственного излучения ночных атмосфер Земли и Марса // Космические исследования. 2024. Т. 62. № 1. С. 46–54.
7. Gagne M.-E., Melo S.M.L., Lefevre F. et al. Modeled  $O_2$  airglow distributions in the Martian atmosphere // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. Art.ID. E06005.
8. Slanger T.G., Huestis D.L.  $O_2(c^1\Sigma_u^- \rightarrow X^3\Sigma_g^-)$  emission in the terrestrial nightglow // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. N A5. P. 3551–3554.
9. Slanger T.G., Copeland R.A. Energetic oxygen in the upper atmosphere and the laboratory // Chem. Rev. 2003. V. 103. P. 4731–4765.
10. Broadfoot A.L., Kendall D.K. The airglow spectrum, 3100-10000 Å // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. N 1. P. 426–428.