

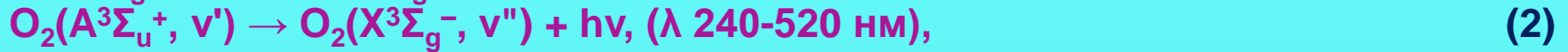
СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ПОЛОС ГЕРЦБЕРГА O₂ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАНЫМИ В НОЧНЫХ АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ И МАРСА

Цель данной работы – провести сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения полос Герцберга с экспериментальными данными об интенсивности ночного свечения молекулярного кислорода O₂* в излучении верхней атмосферы Земли и Марса в спокойных геомагнитных условиях.

Антоненко О.В., Кириллов А.С.
*Полярный геофизический институт
Апатиты .*

- Спектральный состав собственного излучения атмосферы невероятно широк и определяется так же и фотохимическими процессами, которые свойственны отдельным высотным областям. Это позволяет использовать излучение атмосферы в качестве информативного индикатора для дистанционного зондирования атмосферы [*Шефов и др., 2006*].
- Для реализации широких программ исследований были разработаны новые методы и усовершенствованы известные способы измерений различных характеристик эмиссий, определяющих состояние верхней атмосферы Земли [*Шефов и др., 2006*].
- Для реализации программ исследований атмосферы Марса, в частности, собственного излучения, разработанные методы оптической спектроскопии в настоящее время являются одним из основных, если не главным, источником информации об активности атмосферы, получаемой дистанционно [*Кораблёв, 2013*].
- В земных условиях совершенно очевидно, что ночное и даже сумеречное излучение менее интенсивно по сравнению с дневным освещением. На Марсе же первые регистрации ночного свечения $O_2(a^1\Delta_g, v')$ с помощью спектрометров ИК диапазона OMEGA (КА, Марс-Экспресс) и CRISM (КА, Mars Reconnaissance Orbiter) показали, что оно на два порядка менее интенсивное, чем дневное свечение [*Bertaux et al., 2012; Clancy et al., 2012*].

В настоящей работе рассматривается интенсивность излучения полос Герцберга II (1), Герцберга I (2) и, Чемберлена (3).



где v' , v'' – колебательные уровни состояний, λ – длины волн.

Полосы излучения Герцберга II (с-Х) первоначально идентифицированы в лабораторном спектре [*Degen et al., 1968*]. В последствии эти излучения наблюдались в ночном свечении Венеры [*Краснопольский и др., 1976*]. Позднее было сделано заявление, что излучение с-Х можно также зарегистрировать в земном ночном свечении, из спектра с разрешением 0,5 нм [*Slanger et al., 1981*]. Полосы, идентифицированные таким образом, не могут быть подтверждены в спектрах телескопа Кека с разрешением 0,01 нм, поэтому, ссылаясь на [*Slanger and Copeland, 2003*], мы считаем, что система с-Х довольно слаба в свечении атмосферы Земли. Полосы с-Х доминируют в спектре атмосфер,, где преобладает CO_2 [*Краснопольский и др., 1976*].



Молекула кислорода переходит из $A'^3\Delta_u, v'$ в $c^1\Sigma_g^-$ состояние, а в молекуле CO_2 происходит возбуждение симметричной колебательной моды, ускоряет процесс переноса энергии [*Kirillov, 2014*].

41300 cm^{-1} - энергия диссоциации O_2

E (cm^{-1})

40000

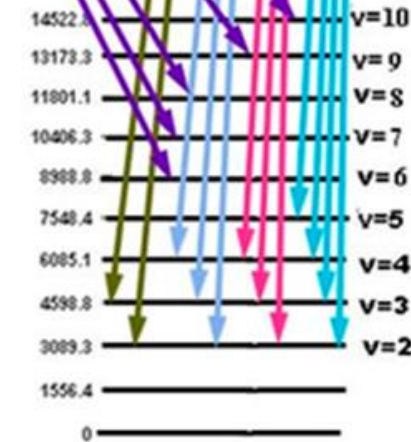
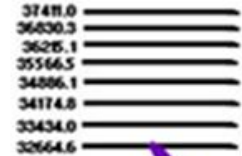
20000

0

$c^1\Sigma_u^-$

$A^3\Sigma_u^+$

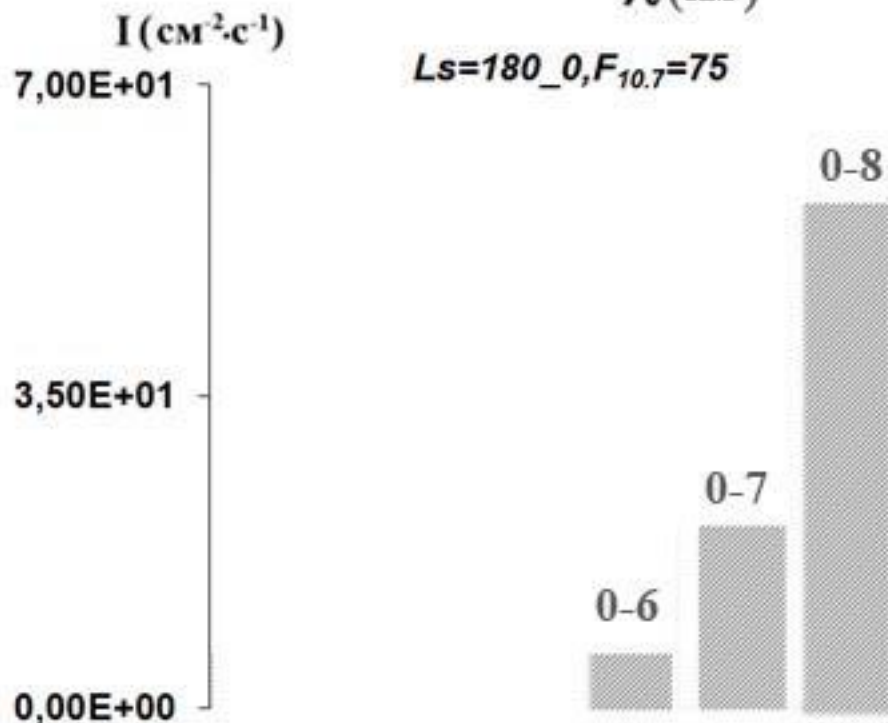
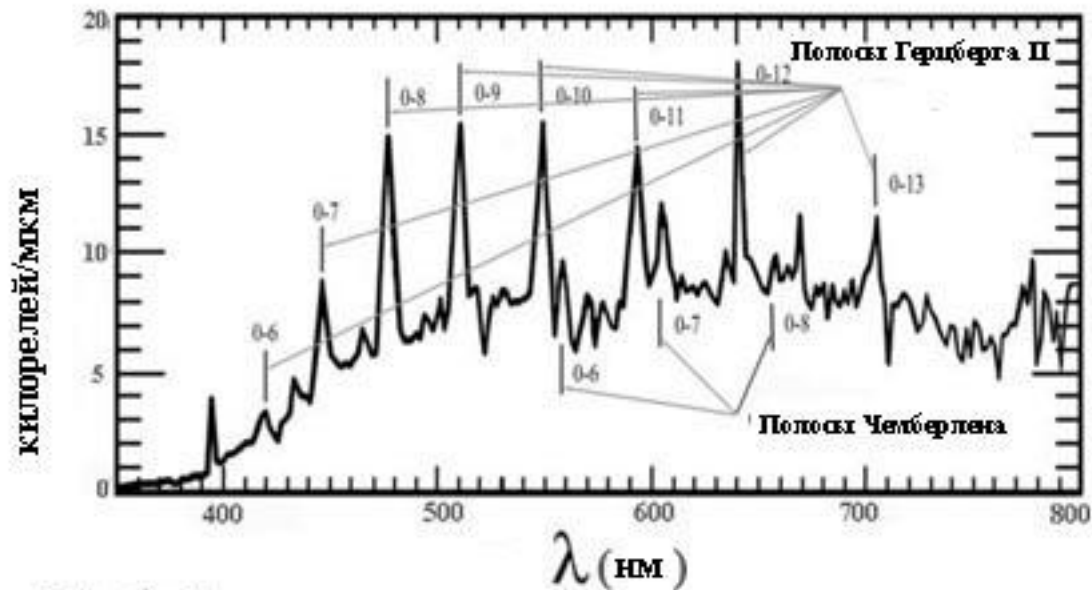
$X^3\Sigma_g^-$



Земля
 $\lambda = 270 - 330 \text{ nm}$

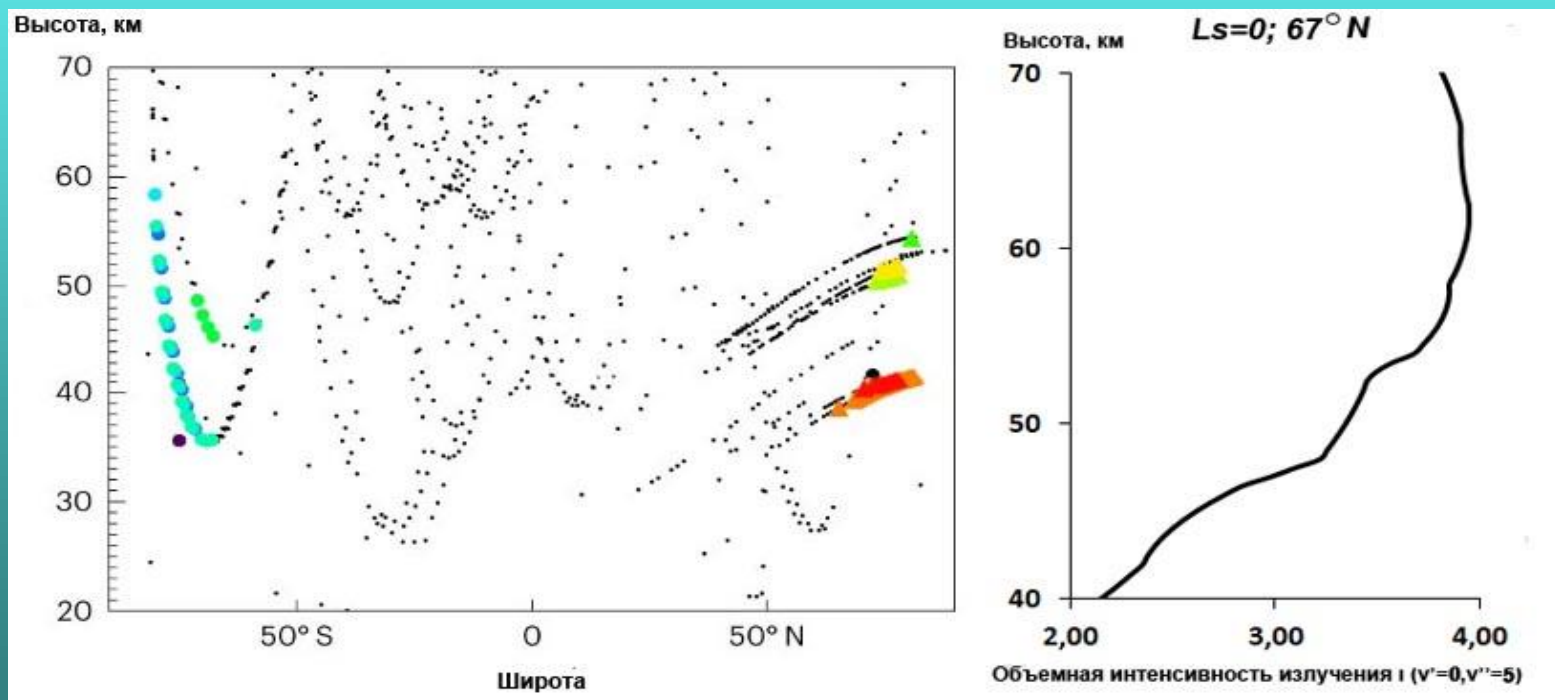
Венера
 $\lambda = 420 - 550 \text{ nm}$

Поэтому, из за такой особенности гашения молекул в среде, где преобладает CO_2 , энергия электронного возбуждения аккумулируется на низких уровнях, в нашем случае – на нулевых. В то время как в атмосфере Земли, где преобладают другие атмосферные составляющие, (O_2 и N_2), энергия электронного возбуждения аккумулируется на ненулевых уровнях.

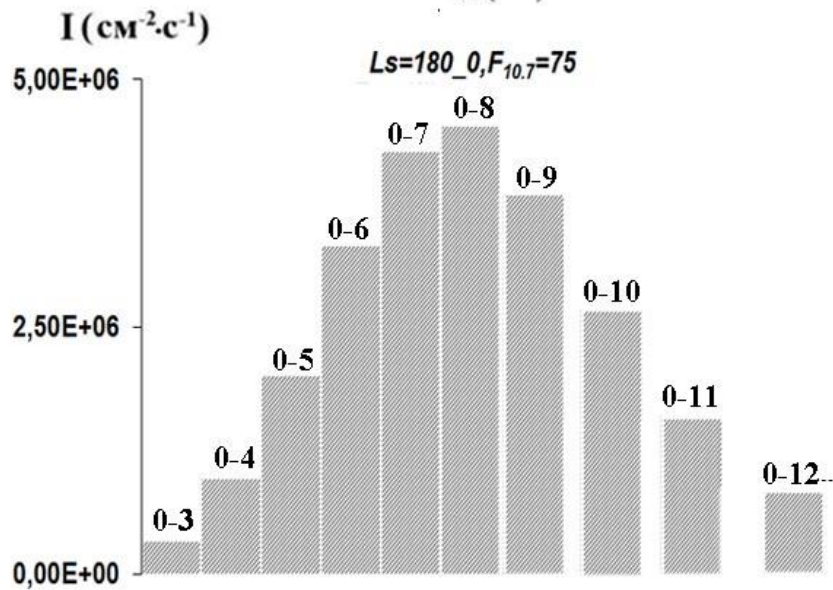
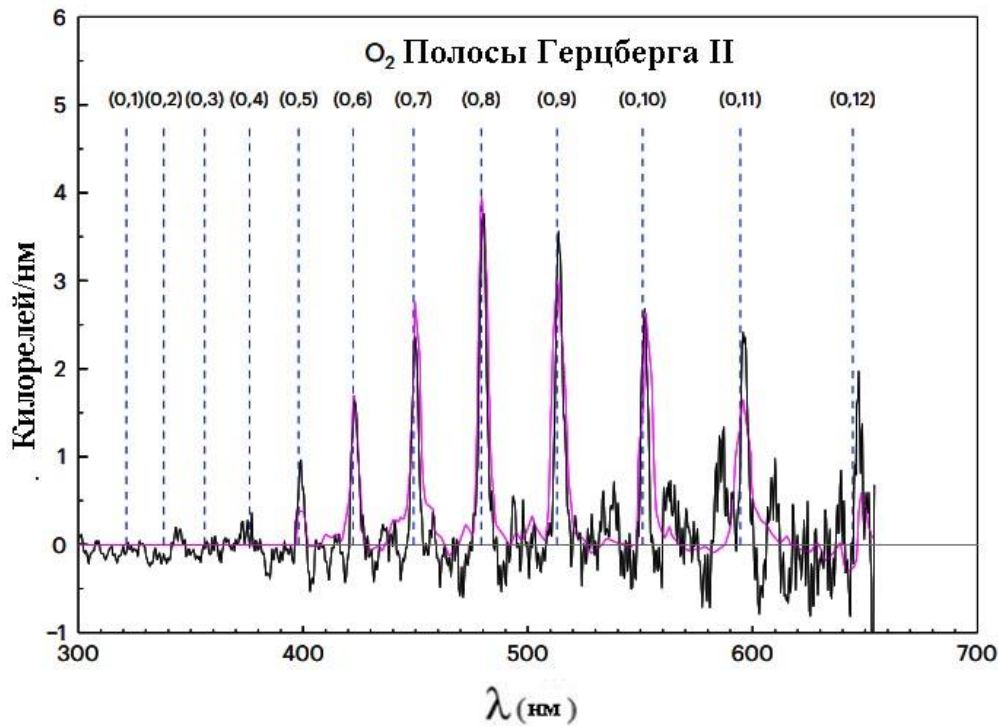


Сверху: спектры свечения ночного неба Венеры, полученные с орбитального космического аппарата «Venus-Express» (вверху). [Migliorini et al. 2013]. Эти авторы показали, что кроме полос Герцберга II в спектрах свечения ночного неба Венеры присутствуют также полосы Чемберлена. Причем регистрируются полосы, обусловленные переходами с нулевых колебательных уровней на различные уровни нижележащих. Снизу: теоретические расчеты (гистограммы), выполненные с учетом особенностей гашения молекул CO_2 , показывающие интенсивность свечения полос Чемберлена.

Измерения ночного излучение на Марсе $O_2^*(a^1\Delta_g)$ 1,27 мкм, сделанное с помощью OMEGA [Bertaux et al., 2012], а также с помощью SPICAM [Fedorova et al., 2012] показали, что инфракрасное излучение атмосферы является наиболее интенсивным (достигает нескольких мегарэлей). До недавнего времени, ориентируясь на сходство между составом атмосфер Венеры и Марса на высоте пика свечения, соответственно, 95 км и 50 км мы могли предполагать, что излучение полос Герцберга II и Чемберлена может происходить в марсианской атмосфере, несмотря на то, что они не были обнаружены. В настоящее время группа планетологов во главе с Жан-Клодом Жераром из французского университета (université de Liège), сообщила, что впервые обнаружено ночное свечение кислорода в атмосфере Марса при помощи спектрометра NOMAD, на борту КА Trace Gas Orbiter. Наблюдения велись в период с марта 2020 года по октябрь 2022 года. Свечение кислорода в полосах Герцберга II было замечено на длинах волн от 400 до 600 нм, на высотах от 34 до 66 км, с пиком на высоте 42 км [Gérard et al., 2024].



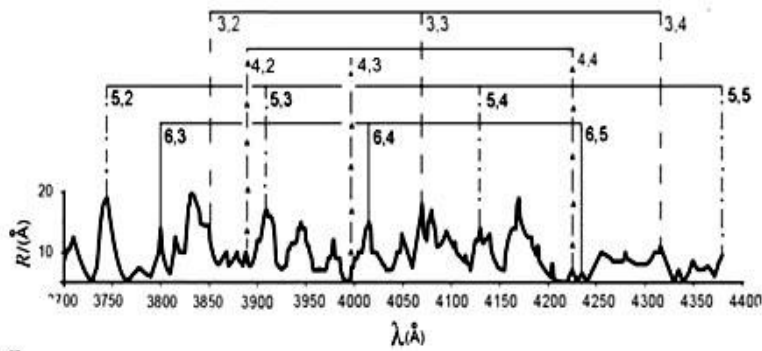
Цвет каждой точки соответствует одной орбите TGO. Маленькие серые точки соответствуют наблюдениям спектральной сигнатуры Герцберга II [Gérard et al., 2024].



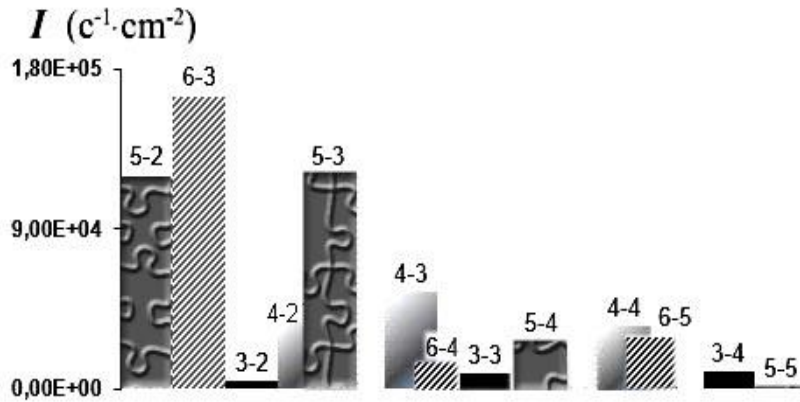
Вверху – рисунок, представленный группой планетологов во главе с Жан-Клодом Жераром [*Gérard et al., 2024*]. Снизу – теоретические расчеты (гистограммы), выполненные с учетом особенностей гашения молекул CO_2 , показывающие интенсивность свечения полос Герцберга II. Такое соответствие во многом обусловлено значениями коэффициентов Эйнштейна A , представленных в таблице 1, взятых у Бейтса [*Bates, 1989*].

Таблица 1 v' $A(v', v''), \text{s}^{-1}$

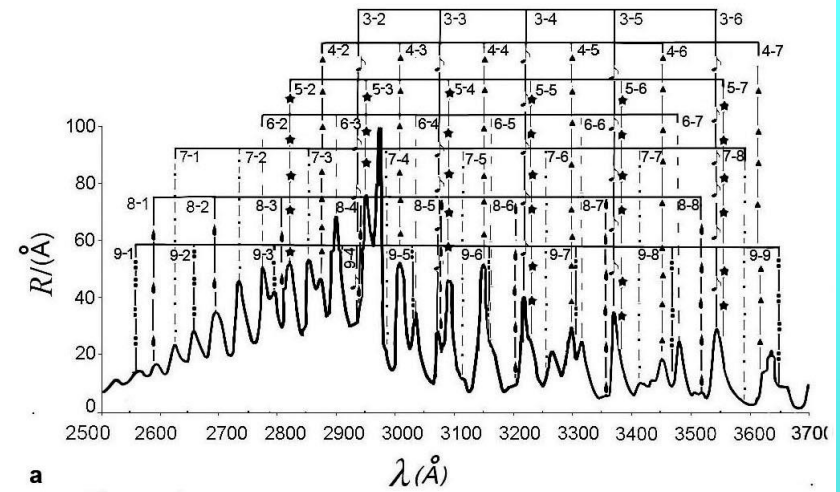
3	0,0038
4	0,011
5	0,023
6	0,038
7	0,049
8	0,052
9	0,044
10	0,031
11	0,018
12	0,0092



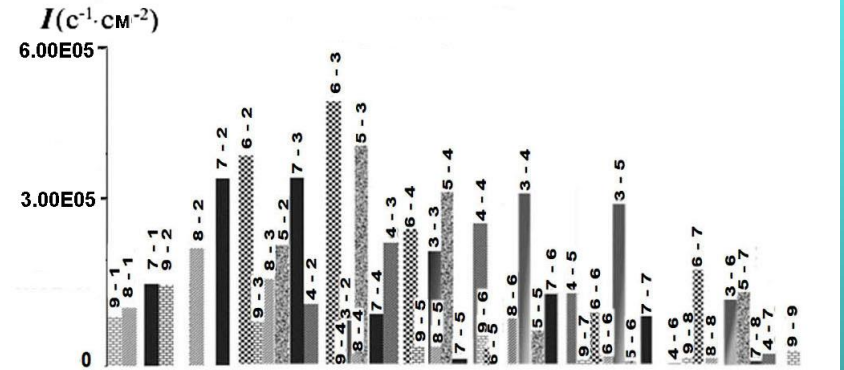
a



б



a



Сверху: фрагменты усредненного спектра свечения ночного неба, измеренного спектрографом с космического шаттла [*Broadfoot and Bellaire, 1999*] (а) - в диапазоне 370-440 нм (3700-4400 Å), (б) - в диапазоне 250-360 нм (2500-3600 Å) (Y – интенсивности ($R/\text{Å}$), X – длины волн λ (Å).

Снизу: рассчитанные значения интегральной светимости (гистограммы) для различных полос Чемберлена и полос Герцберга I для атмосферы Земли для средних широт.

Выводы

- Проведено сопоставление рассчитанных значений интегральной светимости полос Герцберга II для атмосферы Марса с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 300-700 нм, со спектрометра NOMAD, на борту KA Trace Gas Orbiter [*Gérard et al., 2024*].
- Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными значениями интенсивностей свечения полос показало, что наблюдается хорошее согласие для условий Марса, но оно во многом обусловлено значениями коэффициентов Эйнштейна Бейтса [*Bates, 1989*].
- Представлены рассчитанные значения интегральной светимости (гистограммы) полос Чемберлена для условий Венеры. Причем регистрируются полосы, обусловленные переходами с нулевых колебательных уровней на различные уровни нижележащих.
- Представлены рассчитанные значения интегральной светимости (гистограммы) полос Герцберга I и Чемберлена для низкой солнечной активности для средних широт Земли [*Антоненко, Кириллов, 2024*]. Причем регистрируются полосы, обусловленные переходами с ненулевых колебательных уровней на различные уровни нижележащих.
- Показано, что в условиях планет Земной группы, как Марса, так и Венеры, где преобладает CO₂, регистрируемые полосы, рассмотренные в презентации, Герцберга II и Чемберлена, обусловленные переходами с нулевых колебательных уровней на различные уровни нижележащих, в то время, как регистрируемые полосы в условиях атмосферы Земли (здесь: полосы Герцберга I полосы Чемберлена), обусловленные переходами с ненулевых колебательных уровней на основной или возбужденный, но низкий по энергетике.

Спасибо

за

ВНИМАНИЕ!