

DOI: 10.51981/2588-0039.2021.44.040

АНАЛИЗ ИЗЛУЧАЕМЫХ ПОЛОС ЧЕМБЕРЛЕНА И ГЕРЦБЕРГА I В СПЕКТРЕ СВЕЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА ЗЕМЛИ

О.В. Антоненко, А.С. Кириллов

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Россия

Аннотация

Проведены расчеты профилей интенсивностей свечения полос Чемберлена и Герцберга I молекулярного кислорода в ионосфере Земли в ночное время. Выполнено сравнение расчётов интегральных интенсивностей полос Чемберлена и Герцберга I с экспериментальными данными, полученными с космического шаттла "Дискавери" (STS-53) и со спектрографа "EbertFastie" (национальная обсерватория КИТТ – ПИК, США, Аризона). Показано, что наилучшее согласие наблюдается при коррекции квантовых выходов колебательных уровней $A^3\Delta_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ состояний молекулярного кислорода при тройных столкновениях, а также при коррекции коэффициентов Эйнштейна, которые были опубликованы ранее в научной литературе.

Ключевые слова: интенсивности свечения молекулярных полос, космический шаттл, колебательные уровни, состояния электронно-возбуждённого молекулярного кислорода.

1. Введение

Одним из источников свечения ночной атмосферы является электронно-возбуждённый молекулярный кислород $O_2(A^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+)$. На высотах толщиной около 10 км с центром на высоте около 90 км, происходит трёхчастичная рекомбинация, в результате которой образуются электронно – возбуждённые молекулы O_2 . В дальнейшем электронно-возбуждённая молекула кислорода переходит в более низкое по энергии состояние, излучая при этом фотоны света от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра [1].

Сообщество в области аэронавтики все больше интересуется корреляцией измерений ночного свечения неба, полученных наземными приборами, с измерениями, полученными с летательных аппаратов. Во время космических наблюдений со спутников выполняются эксперименты, работающие в режиме моментального снимка с использованием высокопроизводительного оборудования в течение ограниченного времени полета, когда спутник находится над наземной станцией. Единственная космическая платформа, в настоящее время при тщательном планировании наблюдения способная ликвидировать разрыв между наборами спутниковых и наземных данных - это космический шаттл или космическая транспортная система (STS). Несмотря на то, что полет шаттла короткий, обычно всего 7-12 дней, скорость передачи данных высокая, тем более, что наблюдения также могут повторяться каждые 90 минут при прохождении по орбите над многими наземными станциями. Эти локализованные наблюдения с орбиты могут быть столь же значимыми, как и любая наземная кампания наблюдений [2].

В настоящей работе используются спектры, полученные с космического шаттла на протяжении его 11-дневной миссии STS 53, совершившего полет 7-18 сентября 1995 года. Также в работе используются спектры, полученные с пика КИТТ на высоте 2080 м (Национальная обсерватория КИТТ – ПИК, США, Аризона), измеренные спектрографом "EbertFastie".

Цель данной работы – провести сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения полос Чемберлена и Герцберга I с экспериментальных данными по ночному свечению молекулярного кислорода O_2^* в атмосфере Земли. При этом особое внимание будет уделено особенностям образования различных колебательных уровней v' электронно-возбуждённых состояний $A^3\Delta_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ молекулы кислорода в результате тройных столкновений.

2. Свечение ночного неба Земли

На рисунке 1 представлены несколько спонтанных излучательных переходов с различных колебательных уровней состояния $A^3\Delta_u$ на различные колебательные уровни основного состояния $a^1\Delta_g$, при которых происходит излучение наиболее ярких полос Чемберлена. Так же приведено несколько спонтанных излучательных переходов с различных колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ на различные колебательные уровни состояния $X^3\Sigma_g^-$, при которых происходит излучение полос Герцберга I. Все приведённые состояния находятся ниже энергии диссоциации молекулы $O_2 \sim 41300 \text{ см}^{-1}$ ($8065 \text{ см}^{-1} = 1 \text{ эВ}$). Поскольку переходы между рассмотренными нами состояниями дипольно-запрещенные, то характерные излучательные времена

состояний $A^3\Delta_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ порядка 1 и 0.1 секунды, соответственно [3]. Таким образом, даже при давлениях значительно меньше нормального атмосферного столкновительное время жизни состояний $A^3\Delta_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ намного меньше излучательного и их кинетика во многом определяется столкновительными процессами.

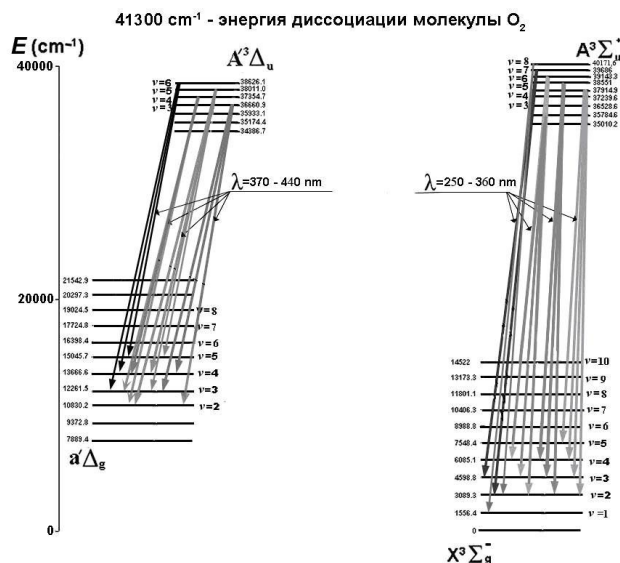


Рисунок 1. Электронные переходы внутри молекулы O_2 .

Проведем расчеты концентраций возбужденного кислорода $\text{O}_2(A^3\Delta_u)$ и $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+)$ и на высотах верхней атмосферы Земли для колебательных уровней $v'=3-8$ для октября месяца, 1976 и 1986 г.г. (низкая солнечная активность, $F_{10.7} = 75$) [4]. При расчетах учтем гашение электронно-возбужденной молекулы $\text{O}_2(A^3\Delta_u)$ и $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+)$ и при излучательных переходах, и при столкновениях с молекулами азота N_2 и кислорода O_2 [5]. Аналитическая формула для расчета квантовых выходов $q_{v'}^{A^1}$ и $q_{v'}^{A^3}$ была представлена в [5].

3. Результаты моделирования

На рисунке 2 (а, в) представлены фрагменты усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 250-360 нм (2500-3600 Å) и, соответственно, в диапазоне 370-440 нм (3700-4400 Å), измеренного спектрографом с космического шаттла “Дискавери” (STS-53) в интервале от 115 до 900 нм на протяжении его 12-дневной миссии в январе 1995 года (условия низкой солнечной активности) [2]. По осям Y отложены значения интенсивностей в рэлях/ангстрем ($\text{R}/\text{Å}$), по осям X отложены длины волн в ангстремах ($\lambda(\text{Å})$). Также представлены рассчитанные значения интегральной светимости $I(\text{cm}^{-2}\text{c}^{-1})$ (гистограммы 3б, 3г) для различных полос Чемберлена и Герцберга I, выполнены для октября 1976 и 1986 г.г. (условия низкой солнечной активности $F_{10.7} = 75$). Как показали расчеты, наблюдается расхождение рассчитанных значений интегральной светимости с экспериментальными значениями для 2, 3 и 4 колебательных уровней в случае полос Чемберлена и для 3 и 4 колебательных уровней в случае полос Герцберга. Данное расхождение, возможно, объясняется либо заниженными значениями квантовых выходов $q_{v'}$ для данных уровней, либо завышенными значениями константы скорости реакции рекомбинации при тройных столкновениях, которая применялась как рассчитанная величина в зависимости от температуры атмосферы на рассмотренном интервале высот согласно [6]. Поэтому мы в настоящих расчетах варьируем значения нормирующих коэффициентов квантовых выходов, увеличив их значения приблизительно на 1/3 для 3 и 4 колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ и, приблизительно в 4 раза для 2, 3 и 4 колебательных уровней состояния $A^3\Delta_u$. Соответственно, значения нормирующих коэффициентов квантовых выходов для других колебательных уровней были уменьшены. При использовании измененных квантовых выходов $q_{v'}^{A^3}$ было достигнуто лучшее согласие рассчитанных спектров интегральной светимости возбужденного кислорода $\text{O}_2^*(A^3\Sigma_u^+, v'=3-8)$ со спектрами, полученными с шаттла [2] - экспериментальными данными свечения ночного неба в диапазоне 250-360 нм (2500-3600 Å), что хорошо видно из рисунка 2 (б).

Для состояния $\text{O}_2(A^3\Delta_u, v'=3-6)$, как показали расчеты, выявилось серьезное расхождение рассчитанных интегральных светимостей со спектрами, полученными с шаттла [2] - экспериментальными данными свечения ночного неба в диапазоне 370-440 нм (3700-4400 Å). В настоящих расчетах варьирование значения нормирующих коэффициентов оказалось не применимо, поскольку значения коэффициентов Эйнштейна для состояния $\text{O}_2(A^3\Delta_u, v')$ значительно изменяются относительно друг друга (на несколько порядков), чего не наблюдается в аналогичных значениях для состояния $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+, v')$. В настоящей работе были проведены коррекции коэффициентов Эйнштейна [3] для состояния $\text{O}_2(A^3\Delta_u, v'=3-6)$, после чего стало возможным

получить хорошее согласие рассчитанных спектров интегральной светимости (гистограмм) со спектрами, полученными с летательного аппарата [2], варьируя значения нормирующих коэффициентов для вышеуказанного состояния O_2^* . Это видно из рисунка 2 (г).

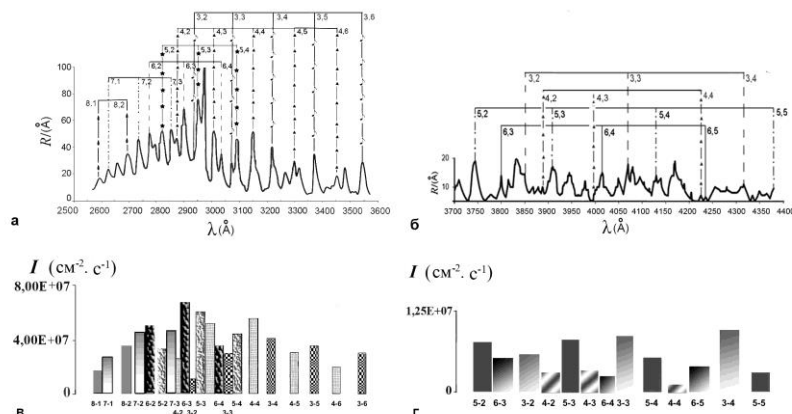


Рисунок 2. Фрагменты усредненного спектра свечения ночного неба, рассчитанные значения интегральной светимости для различных полос Герцберга I с учетом измененных квантовых выходов q_{v^A} , для различных полос Чемберлена с учетом измененных квантовых выходов $q_{v^{A'}}$ [5] и измененных коэффициентов Эйнштейна [3].

Так же представлены на рисунке 3(а) значения спектра свечения ночного неба в диапазоне длин волн 370-440 нм (3700-4400 Å), измеренного спектрографом “EbertFastie” с пика КИТТ на высоте 2080 м (Национальная обсерватория КИТТ – ПИК, США, Аризона) [7], 3 (в) - рассчитанные значения интегральной светимости для различных полос Чемберлена с учетом измененных квантовых выходов $q_{v^{A'}}$ [5] и измененных коэффициентов Эйнштейна [3]. По оси Y – интенсивности ($R/\text{Å}$), X – длины волн λ (Å). В УФ длинах волн (3100-4500 Å) использовался ультрафиолетовый источник низкой яркости [8]. Обсерватория функционирует с 1958 г., однако, автор описывает наблюдения, ссылаясь на труды 1961-1964 г.г. – период низкой солнечной активности.

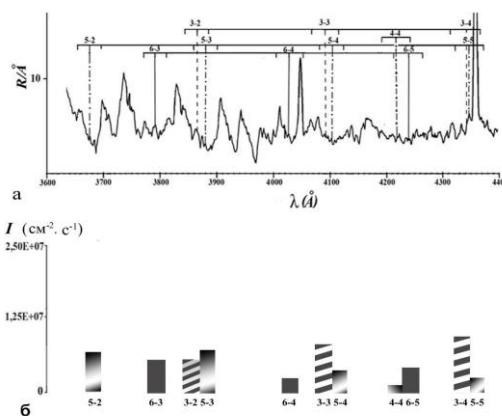


Рисунок 3. Фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба, рассчитанные значения интегральной светимости для различных полос Чемберлена.

В данном случае удовлетворительное согласие результатов расчетов с экспериментальными данными с шаттла “Дискавери” (STS-53) [2] и с обсерватории КИТТ – ПИК [7], удалось получить благодаря коррекции коэффициентов Эйнштейна [3] и квантовых выходов $q_{v^{A'}}$, которые в [5] аппроксимировались аналитической формулой. В большинстве случаев спектральных измерений (как и в [2; 7]), результаты представляются в виде кривых без разрешения по вращательной структуре. Поэтому в настоящей работе мы проводим сравнение результатов расчета (гистограмм) с максимальными значениями кривых для каждого рассмотренного излучательного перехода.

На рисунке 4 (а, б) показано графическое отображение исходных и измененных значений квантовых выходов $q_{v^{A'}}$ и q_{v^A} . По осям Y приведены значения квантовых выходов, по осям X приведены значения колебательных уровней v' . Профили измененных значений $q_{v^{A'}}$ и q_{v^A} даны пунктирными линиями.

Рассчитаны соотношения объёмной интенсивности излучения для состояния $A^3\Sigma_u^+$, с которого происходит переход Герцберга I, и состояния $A'^3\Delta_u$, с которого происходит переход Чемберлена, для колебательных уровней $v'=3-8$, за октябрь месяц 1976 и 1986 г.г., при низкой солнечной активности $F_{10.7}=75$. Интенсивность излучения полос Чемберлена составляет $\approx 40\%$ от интенсивности излучения полос Герцберга I, что показано авторами: [1, 2].

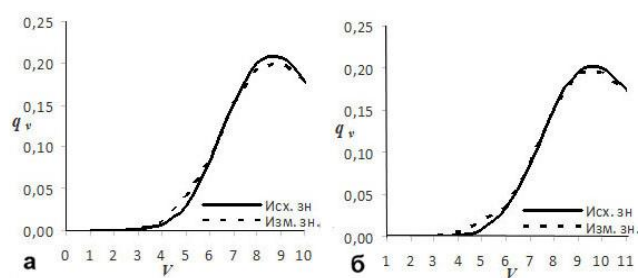


Рисунок 4. Исходные и изменённые значения квантовых выходов для состояний $A^3\Sigma_u^+$ (а) и $A'^3\Delta_u$ (б).

4. Заключение

Получены значения интегральной светимости полос Герцберга I, обусловленных излучательными переходами с колебательных уровней $v'=3-8$ электронно-возбуждённого кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ для условий низкой ($F_{10.7}=75$, 1976 и 1986 г.г.) солнечной активности для средних широт. Проведено сравнение рассчитанных значений интегральной светимости полос Герцберга I в условиях низкой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 250-360 нм (2500-3600 Å) спектрографом с космического шаттла [2] в условиях низкой солнечной активности (сентябрь 1995 г.). Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными значениями интенсивностей полос показало, что лучшее согласие наблюдается после коррекции квантовых выходов колебательных уровней q_{v^A} состояния $A^3\Sigma_u^+$ в результате тройных столкновений, которые были представлены в [5].

Получены значения интегральной светимости полос Чемберлена, обусловленных излучательными переходами с колебательных уровней $v'=3-6$ электронно-возбуждённого кислорода $O_2(A'^3\Delta_u)$ для условий низкой ($F_{10.7}=75$, 1976 и 1986 г.г.) солнечной активности для средних широт. Проведено сравнение рассчитанных значений интегральной светимости полос Чемберлена в условиях низкой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 370-440 нм (3700-4400 Å), спектрографом с космического шаттла [2] и с обсерватории КИТТ – ПИК [7] в условиях низкой солнечной активности. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными значениями интенсивностей полос показало, что удовлетворительного согласия удалось достигнуть, благодаря коррекции коэффициентов Эйнштейна [3] и квантовых выходов q_{v^A} состояния $A'^3\Delta_u$ в результате тройных столкновений, которые были представлены в [5].

Литература

1. Slanger T.G., Copeland R.A. Energetic Oxygen in the Upper Atmosphere and the Laboratory // Chem. Rev. V.103. №12. P.4731-4765. 2003.
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. V.104. №A8. P.17127-17138. 1999.
3. Bates D.R. Oxygen band system transition arrays // Planet. Space Sci.. V.37. №7. P.881-887. 1989.
4. 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 // Известия РАН. Серия физическая. Т.85. №3. С.310-314. 2021.
5. Кириллов А.С. Моделирование населенностей колебательных состояний молекулярного кислорода, исходных для полос Герцберга, на высотах нижней термосферы и мезосферы // Геомагнетизм и Аэронавтика. Т.52. №2. С.258-264. 2012.
6. Krasnopolsky V.A. Excitation of the oxygen nightglow on the terrestrial planets // Planet. Space Sci.. V.59. №8. P.754-766. 2011.
7. Broadfoot A.L., Kendall K.R. The Airglow Spectrum, 3100-10,000 Å // J. Geophys. Res.. V.73. №1. P.426-428. 1968.
8. Broadfoot A.L., Hunten D.M. Excitation of N_2 band systems in aurora // Can. J. Phys.. V.42. №6. P.1212-1230. 1964.