

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ ПОЛОС ЧЕМБЕРЛЕНА И ГЕРЦБЕРГА I В НОЧНОМ НЕБЕ ЗЕМЛИ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

© 2022 г. О. В. Антоненко<sup>1</sup>, \*, А. С. Кириллов<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт (ПГИ),  
г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

\*e-mail: antonenko@pgia.ru

\*\*e-mail: kirillov@pgia.ru

Поступила в редакцию 14.10.2021 г.

После доработки 21.01.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

Проведены расчеты профилей объемных интенсивностей свечения полос Чемберлена и Герцберга I молекулярного кислорода в атмосфере Земли в ночное время. Выполнено сравнение расчетов интенсивностей свечения 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 результатов расчетов с экспериментальными данными наблюдается при коррекции квантовых выходов колебательных уровней  $A^3\Delta_u$  и  $A^3\Sigma_u^+$  состояний молекулярного кислорода при тройных столкновениях.

DOI: 10.31857/S0016794022040034

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Осознание возможности излучения верхней атмосферы на средних и в низких широтах в спокойных геомагнитных условиях не возникало до тех пор, пока не появилось стремление оценить освещенность поверхности планеты в ночное время. Так, к концу второго десятилетия XX века стало очевидным, что в атмосфере Земли происходят процессы, отображением которых является собственное свечение ночной атмосферы в спокойных геомагнитных условиях [Шефов и др., 2006].

Известно, что одним из источников свечения ночной атмосферы является электронно-возбужденный молекулярный кислород  $O_2(A^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+)$ , образующийся при тройных столкновениях в атмосфере Земли с участием двух атомов O и третьей частицы

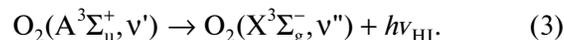


где  $v'$  – колебательные уровни указанных состояний; M – третья частица при столкновении. Атомы кислорода эффективно образуются в атмосфере Земли в дневное время при фотодиссоциации молекул  $O_2$  солнечным УФ-излучением  $O_2 + hv \rightarrow O + O$ . Тройные столкновения (1) с образованием  $O_2(A^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+)$  наиболее эффективны в слое атмосферы Земли толщиной ~10 км

с центром на высоте ~90 км [Шефов и др., 2006; Broadfoot and Bellaire, 1999]. В дальнейшем электронно-возбужденная молекула кислорода переходит в более низкое по энергии состояние, излучая при этом фотоны света. Спонтанные переходы с электронно-возбужденного  $A^3\Delta_u$  на электронно-возбужденное  $a^1\Delta_g$  состояние молекулы кислорода приводит к свечению полос Чемберлена (Ch)



а переходы с электронно-возбужденного  $A^3\Sigma_u^+$  на основное  $X^3\Sigma_g^-$  состояние молекулы кислорода приводит к свечению полос Герцберга I (HI)



В настоящей работе используются экспериментальные данные о характерных концентрациях [O] в вышеуказанном слое на основании характеристик свечения атомарного кислорода O для различных месяцев года в условиях низкой ( $F10.7 = 75$ , 1976 и 1986 гг.) и высокой ( $F10.7 = 203$ , 1980 и 1981 гг.) солнечной активности на средних широтах (55.7° N; 36.8° E, Звенигородская обсерватория Института физики атмосферы (ИФА) им. А.М. Обухова РАН). Регулярные данные по свечению атомарного кислорода O были получены из полуэмпирической модели, интегрирую-

шей несколько типов различных среднеширотных измерений, регрессионных соотношений и теоретических расчетов на протяжении нескольких десятков лет сотрудниками ИФА [Шефов и др., 2006]. В соответствии с основными сезонными закономерностями вариаций интенсивности эмиссии 557.7 нм слой атомарного кислорода так же значительно изменяет положение своего максимума как в зависимости от месяца наблюдений, так и от солнечной активности [Шефов и др., 2006; Перминов и др., 1998]. Увеличение солнечной активности приводит к росту концентрации O в максимуме слоя и к опусканию его нижней границы [Семенов и Шефов, 1999].

Полученные результаты показали значительный разброс значений абсолютных концентраций атомарного кислорода в максимуме слоя, высота которого также оставалась не постоянной. Результаты проведенных модельных расчетов по эмиссии 557.7 нм выявили, что существует отрицательная корреляция между высотой максимума атомарного кислорода и его концентрацией. Причем отрицательная корреляция четко прослеживается между интенсивностью эмиссии 557.7 нм и высотой максимума излучающего слоя как для сезонных вариаций, так для зависимости от солнечной активности [Семенов и Шефов, 1997; Shefov et al., 2000].

В результате изменения профилей концентраций атомарного кислорода неизбежно изменяются профили скоростей образования электронно-возбужденного молекулярного кислорода  $O_2^*$  в атмосфере Земли в результате процесса (1) и интенсивности свечения различных полос молекулярного кислорода. Поэтому интенсивности свечения полос Чемберлена и Герцберга I зависят как от времени года, так и от солнечной активности.

В настоящей работе рассмотрены процессы возбуждения и гашения электронно-возбужденного молекулярного кислорода в атмосфере Земли на высотах свечения ночного неба. При этом следует отметить, что полосы Герцберга I имеют широкий спектр свечения в ночном небе Земли, в отличие от полос Чемберлена, которые присутствуют в меньшем спектральном диапазоне.

Цель данной работы – провести сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения полос Чемберлена и Герцберга I с экспериментальными данными по ночному свечению молекулярного кислорода  $O_2^*$  в атмосфере Земли. Особое внимание уделено особенностям образования различных колебательных уровней  $v'$  электронно-возбужденных состояний  $A^3\Delta_u$  и  $A^3\Sigma_u^+$  молекулы кислорода в результате тройных столкновений (1).

## 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. Также 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 приведенные состояния находятся ниже энергии диссоциации молекулы  $O_2 \sim 41\,300\text{ см}^{-1}$  ( $8065\text{ см}^{-1} = 1\text{ эВ}$ ). Длину волны  $\lambda$  полос Чемберлена и Герцберга I можно рассчитать по формулам:

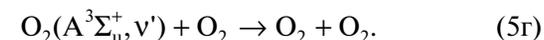
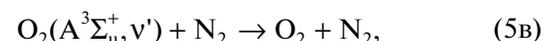
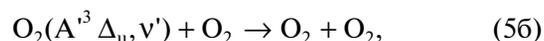
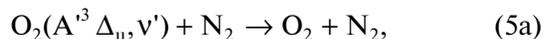
$$\lambda_{Ch} = 1/(E_{A'(v')} - E_{a(v'')}), \quad (4a)$$

где  $E_{A'(v')}$  ( $\text{см}^{-1}$ ) – энергия колебательного уровня  $v'$  состояния  $A^3\Delta_u$ ;  $E_{a(v'')}$  ( $\text{см}^{-1}$ ) – энергия колебательного уровня  $v''$  состояния  $a^1\Delta_g$ ,

$$\lambda_{HI} = 1/(E_{A(v')} - E_{X(v'')}), \quad (4б)$$

где  $E_{A(v')}$  ( $\text{см}^{-1}$ ) – энергия колебательного уровня  $v'$  состояния  $A^3\Sigma_u^+$ ;  $E_{X(v'')}$  ( $\text{см}^{-1}$ ) – энергия колебательного уровня  $v''$  состояния  $X^3\Sigma_g^-$ .

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 с соответственно [Bates, 1989]. Поэтому при расчетах концентраций электронно-возбужденного кислорода необходимо учесть гашение молекул  $O_2(A^3\Delta_u)$  и  $O_2(A^3\Sigma_u^+)$  не только при излучательных переходах (2), (3), но и при столкновениях с молекулами азота  $N_2$  и кислорода  $O_2$  [Кириллов, 2012]:



Так как концентрации  $N_2$  на высотах 90–100 км превышают  $10^{13}\text{ см}^{-3}$ , а константы гашения состояний  $A^3\Delta_u$  и  $A^3\Sigma_u^+$  больше  $\sim 10^{-12}\text{ см}^3\text{ с}^{-1}$  [Kirillov, 2010, 2014], то столкновительные времена жизни рассматриваемых колебательных уровней данных состояний либо сравнимы, либо намного меньше излучательных на высотах ночного свечения полос Чемберлена и Герцберга I. Это означает, что

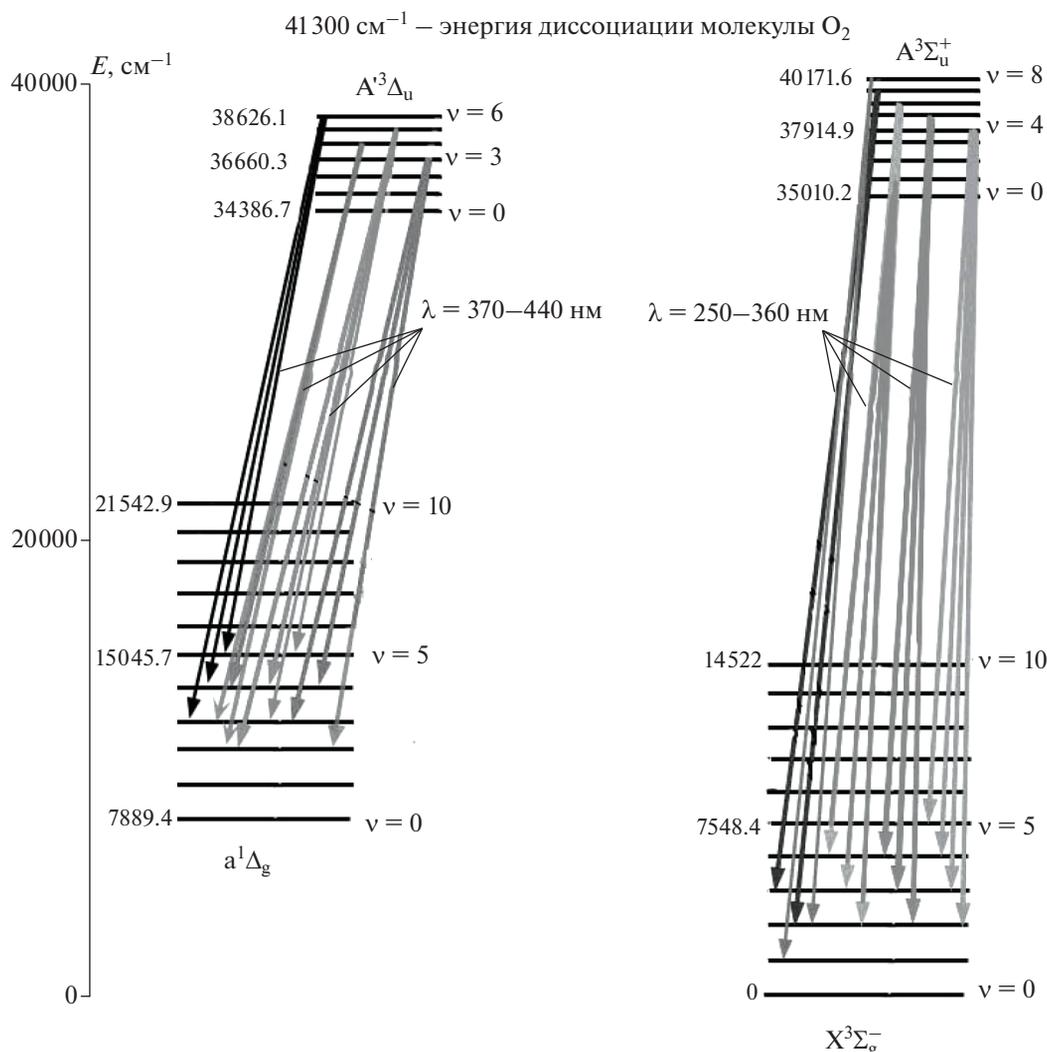


Рис. 1. Электронные переходы внутри молекулы O<sub>2</sub>.

кинетика состояний Герцберга на рассматриваемом диапазоне высот атмосферы во многом определяется столкновительными процессами.

Проведены расчеты концентраций возбужденного кислорода O<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Δ<sub>u</sub>) и O<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) на высотах верхней атмосферы Земли для колебательных уровней v' = 3–8 обоих состояний для октября месяца, 1976 и 1986 гг. (низкая солнечная активность, F10.7 = 75) [Антоненко и Кириллов, 2021]. При расчете концентраций электронно-возбужденного кислорода O<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Δ<sub>u</sub>) и O<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) воспользуемся формулами (6а, б):

$$[O_2(A^3 \Delta_u, v')] = q_{v'}^{A'} \alpha_{A'} k_1 [O]^2 \times ([N_2] + [O_2]) / (A_{v'}^{A'} + k_{5a}[N_2] + k_{5b}[O_2]), \quad (6a)$$

$$[O_2(A^3 \Sigma_u^+, v')] = q_{v'}^A \alpha_A k_1 [O]^2 \times ([N_2] + [O_2]) / (A_{v'}^A + k_{5b}[N_2] + k_{5r}[O_2]), \quad (6б)$$

где α<sub>A'</sub> и α<sub>A</sub> – квантовые выходы состояний A<sup>3</sup>Δ<sub>u</sub> и A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup> при тройных столкновениях (1), а q<sub>v'</sub><sup>A'</sup> и q<sub>v'</sub><sup>A</sup> – квантовые выходы колебательных уровней v' этих состояний соответственно; k<sub>1</sub> – константа скорости реакции рекомбинации при тройных столкновениях (1), k<sub>5a</sub>, k<sub>5б</sub>, k<sub>5в</sub>, k<sub>5r</sub> – константы скоростей реакций (5а–5г); A<sub>v'</sub><sup>A'</sup> и A<sub>v'</sub><sup>A</sup> – сумма коэффициентов Эйнштейна для всех спонтанных излучательных переходов с колебательных уровней v' состояний A<sup>3</sup>Δ<sub>u</sub> и A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>, причем для состояния A<sup>3</sup>Δ<sub>u</sub> необходимо также учесть спонтанные переходы на основное состояние X<sup>3</sup>Σ<sub>g</sub><sup>-</sup>, при кото-

рых происходит излучение полос Герцберга III [Bates, 1989].

Константа скорости реакции рекомбинации  $k_1$  ( $\text{см}^6 \text{с}^{-1}$ ) применялась как рассчитанная величина в зависимости от температуры атмосферы на рассмотренном интервале высот согласно Шефов и др. [2006]; константы гашения электронно-возбужденного кислорода при двойных столкновениях молекулярного кислорода с частицами атмосферных составляющих  $k_{5a}$  ( $\text{см}^3 \text{с}^{-1}$ ),  $k_{5b}$  ( $\text{см}^3 \text{с}^{-1}$ ),  $k_{5c}$  ( $\text{см}^3 \text{с}^{-1}$ ) учитывались согласно Kirillov [2010, 2014]; квантовые выходы  $\alpha_{A^*}$  и  $\alpha_A$  — согласно Krasnopolsky [2011], коэффициенты Эйнштейна для всех спонтанных переходов — согласно Bates [1989].

Аналитическая формула для расчета квантовых выходов  $q_{v'}^{A^*}$  и  $q_{v'}^A$  была представлена в работе [Кириллов, 2012]:

$$q_{v'} \sim \exp[-(E_{A^*,A(v')} - E_0)^2 / \beta^2], \quad (7)$$

где  $E_0 = 40000 \text{ см}^{-1}$ ,  $\beta = 1500 \text{ см}^{-1}$  — параметры, определенные методом наименьших квадратов путем сравнения рассчитанных колебательных населенностей состояний  $A^3\Delta_u$  и  $A^3\Sigma_u^+$  с результатами наземных наблюдений. Формула (7) была использована для расчета значений  $q_{v'}^{A^*}$  и  $q_{v'}^A$ , при этом была произведена нормировка значений квантовых выходов, чтобы сумма для каждого электронно-возбужденного состояния была равна единице.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ ПОЛОС ЧЕМБЕРЛЕНА И ГЕРЦБЕРГА I

Согласно формулам (6а, б) проведен расчет профилей высотного распределения концентраций электронно-возбужденного молекулярного кислорода  $O_2^*$  для состояний  $A^3\Delta_u$  и  $A^3\Sigma_u^+$  в верхней атмосфере Земли. При расчетах значений концентраций электронно-возбужденного кислорода использовались высотные профили температур, составленные на основе данных многолетних (1960–2000 гг.) измерений профилей температуры на высотах 30–110 км [Семенов и др., 2004]. Разработанная этими авторами методика расчета высотных профилей температуры и суммарной концентрации атмосферы позволяет определять значения температуры и плотности атмосферы на средних широтах для заданных геологических условий (высота, уровень солнечной активности, год).

Значения объемных интенсивностей излучения полос, соответствующих переходам (2) и (3), были рассчитаны по формуле:

$$i_{v',v''}(\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}) = [O_2^*] A_{v',v''}, \quad (8)$$

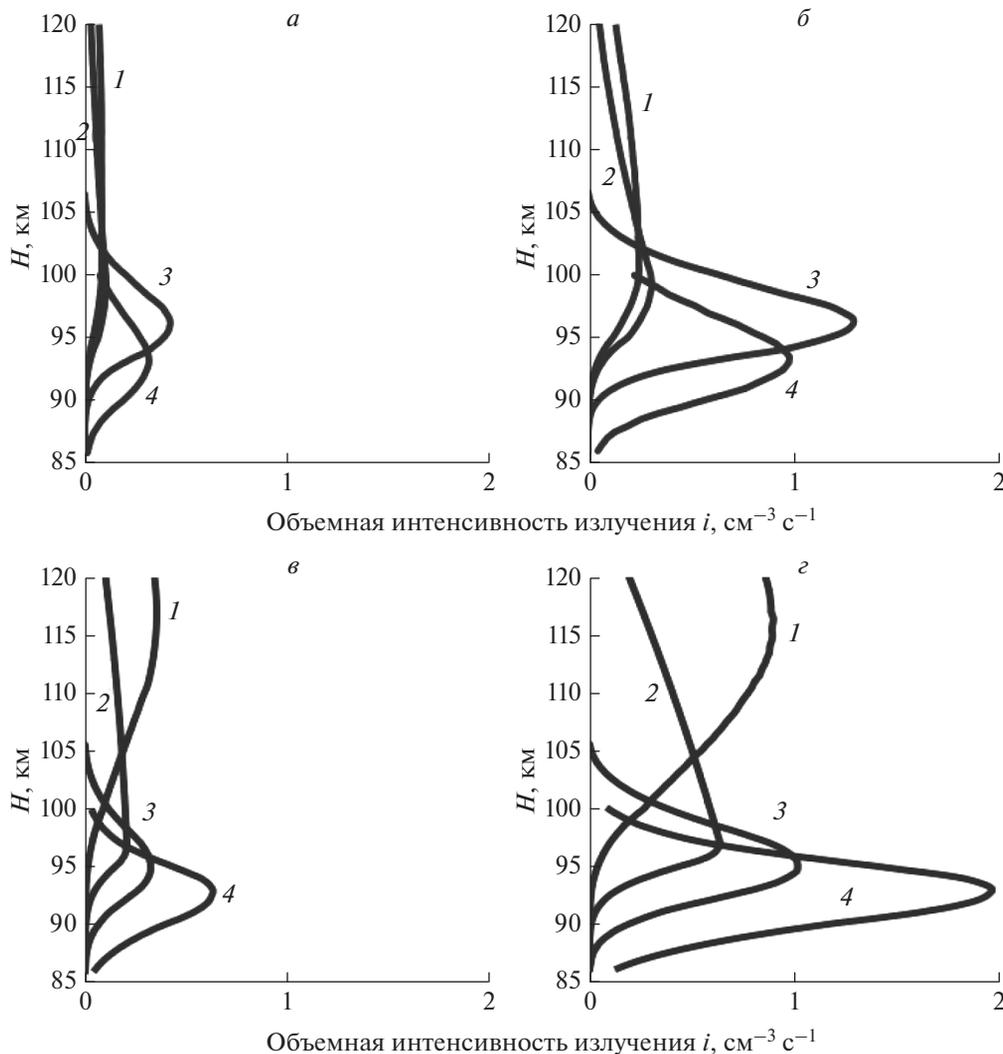
где  $[O_2^*]$  ( $\text{см}^{-3}$ ) — рассчитанная концентрация электронно-возбужденного кислорода  $O_2^*$  в зависимости от высоты  $h$  [Антоненко и Кириллов, 2021];  $A_{v',v''}$  ( $\text{с}^{-1}$ ) — коэффициент Эйнштейна, соответствующий спонтанному излучательному переходу с колебательного уровня  $v'$  вышележащего состояния на колебательный уровень  $v''$  нижележащего состояния в (2) и (3) [Bates, 1989].

На рисунке 2 показаны рассчитанные высотные распределения объемных интенсивностей излучения полос, связанных со спонтанными переходами  $A^3\Delta_u (v' = 6) \rightarrow a^1\Delta_g (v'' = 3)$  (2а, в) и  $A^3\Sigma_u^+ (v' = 6) \rightarrow X^3\Sigma_g^- (v'' = 3)$  (2б, г), для условий низкой ( $F10.7 = 75$ , 1976 и 1986 гг.) (2а, б) и высокой ( $F10.7 = 203$ , 1980 и 1981 гг.) (2в, г) солнечной активности на средних широтах Земли. Цифрами представлены месяцы года: 1 — январь, 2 — апрель, 3 — июль, 4 — октябрь. При расчетах использовались данные по концентрациям атомарного кислорода для средних месяцев каждого сезона. По осям  $X$  приведены значения объемной интенсивности излучения  $i$  ( $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$ ), по осям  $Y$  отложены высоты в км.

На рисунке 3а, б представлены фрагменты усредненного спектра свечения ночного неба в диапазонах 370–440 нм и 250–360 нм соответственно, измеренного спектрографом с космического шаттла “Дискавери” (STS-53) в интервале от 115 до 900 нм на протяжении его 12-дневной миссии в январе 1995 г. (условия низкой солнечной активности) [Broadfoot and Bellaire, 1999]. По осям  $Y$  отложены значения интенсивностей в рэлях/ангстрем ( $R/\text{Å}$ ) ( $1 R = 10^6 \text{ фотон/см}^2 \text{с}$ ), по осям  $X$  отложены длины волн в ангстремах ( $\lambda(\text{Å})$ ). Каждая двойка цифр над пиками свечения обозначает колебательные уровни ( $v'-v''$ ) при излучательных переходах (2) и (3).

Рассчитанные значения интенсивности излучения  $I$  ( $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ) (гистограммы) для различных полос Чемберлена и Герцберга I, обусловленных излучательными переходами (2), (3) и представленных на рис. 1, выполнены для октября 1976 и 1986 гг. (условия низкой солнечной активности  $F10.7 = 75$ ) в этом же диапазоне длин волн. Результаты расчетов приведены на рис. 3в, г, при этом при пересчете объемной интенсивности излучения  $i_{v',v''}$  в интенсивность излучения  $I_{v',v''}$  используется приближение оптически тонкого слоя, т.е. пренебрегается поглощением фотонов внутри слоя.

Как показали расчеты, наблюдается расхождение рассчитанных значений интенсивности излучения с экспериментальными значениями для 3 и

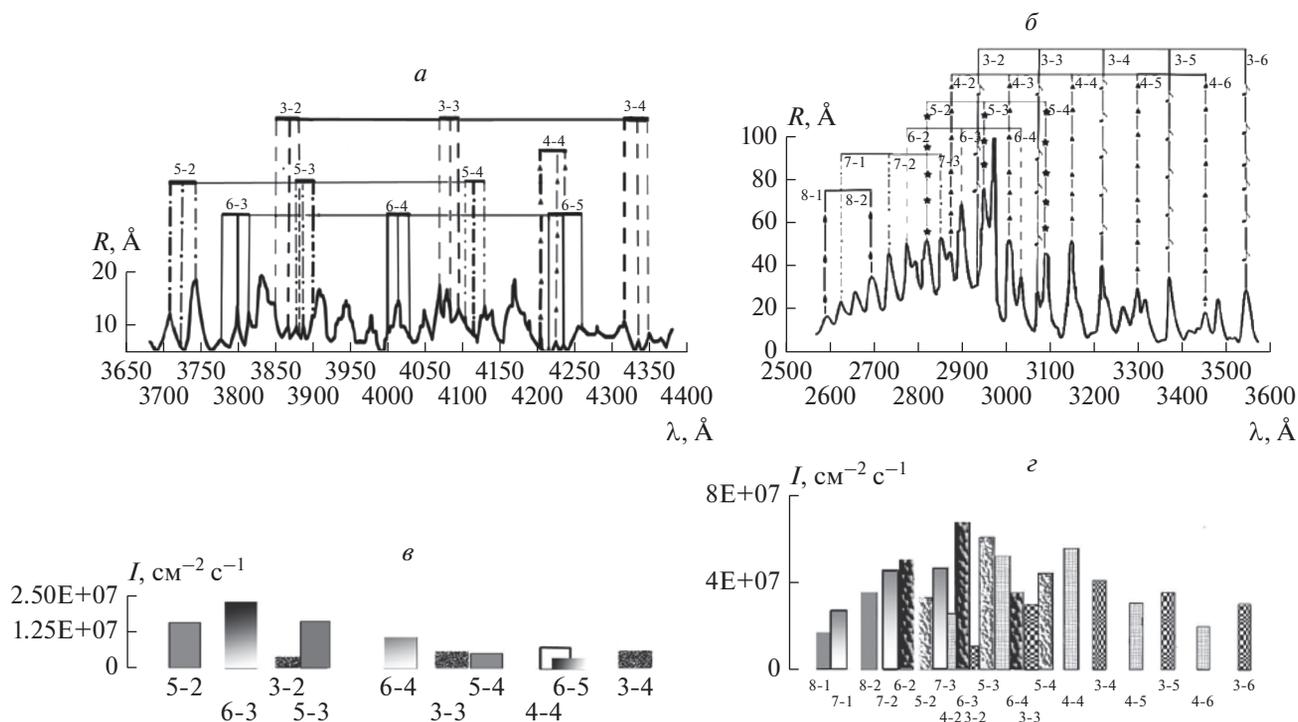


**Рис. 2.** Рассчитанные высотные распределения объемной интенсивности излучения  $i_{\nu}^{\Lambda}$  ( $\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ ) полос Чемберлена (а, в) и Герцберга I (б, г) для различных месяцев года (1 – январь, 2 – апрель, 3 – июль, 4 – октябрь) на средних широтах Земли.

4-го колебательных уровней в случае полос Чемберлена и для 3 и 4-го колебательных уровней в случае полос Герцберга. Данное расхождение, возможно, объясняется либо заниженными значениями квантовых выходов  $q_{\nu}^{\Lambda}$  для данных колебательных уровней, либо завышенными значениями констант процессов гашения ( $5a-5g$ ) при столкновении с молекулами  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$ .

В работах [Kirillov, 2010, 2014] рассчитанные константы для процессов гашения электронного возбуждения состояний Герцберга показали хорошее согласие с результатами лабораторных измерений. Что касается квантовых выходов  $q_{\nu}^{\Lambda}$  и  $q_{\nu}^{\Lambda}$ , то при оценке их в работе [Кириллов, 2012] изначально использовалась аналитическая формула

(7), которая могла давать погрешность для колебательных уровней с малыми значениями. Поэтому мы в настоящих расчетах варьируем значения квантовых выходов (табл. 1), увеличив их значения приблизительно на 1/3 для 3 и 4-го колебательных уровней состояния  $\text{A}^3\Sigma_u^+$  [Антоненко и Кириллов, 2021]. Для состояния  $\text{A}^3\Delta_u$  увеличение значений нормирующих коэффициентов квантовых выходов для различных колебательных уровней варьируются следующим образом: для 3-го уровня в 5 раз, для 4-го уровня – в 1.5 раза. Соответственно, значения нормирующих коэффициентов квантовых выходов для других колебательных уровней были уменьшены, что также показано в табл. 1. При использовании измененных квантовых выходов  $q_{\nu}^{\Lambda}$  было достигнуто луч-



**Рис. 3.** (а) – Фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 370–440 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла [Broadfoot and Bellaire, 1999]:  $Y$  – интенсивности ( $R/\text{Å}$ ),  $X$  – длины волн ( $\lambda$ ,  $\text{Å}$ ), цифры над пиками – ( $v'-v''$ ) при излучательных переходах (2); (б) – фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 250–360 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла [Broadfoot and Bellaire, 1999]:  $Y$  – интенсивности ( $R/\text{Å}$ ),  $X$  – длины волн ( $\lambda$ ,  $\text{Å}$ ), цифры над пиками – ( $v'-v''$ ) при излучательных переходах (3); (в) – рассчитанные значения интенсивности излучения для различных полос Чемберлена с учетом измененных квантовых выходов  $q_v^A$ ; (г) – рассчитанные значения интенсивности излучения для различных полос Герцберга I с учетом измененных квантовых выходов  $q_v^A$ .

шее согласие рассчитанных интенсивностей полос излучения возбужденного кислорода  $O_2^*$  ( $A^3\Sigma_u^+$ ,  $v' = 3-8$ ) со спектрами, полученными с шаттла [Broadfoot and Bellaire, 1999] – экспериментальными данными свечения ночного неба в диапазоне 250–360 нм, что хорошо видно из рис. 3г.

Для состояния  $O_2(A^3\Delta_u, v' = 3-6)$  сравнение теоретически рассчитанных значений интенсивностей полос с экспериментальными данными значительно труднее сделать, поскольку интенсивности свечения полос Чемберлена значительно меньше и экспериментальные погрешности больше. На рис. 3в приведены результаты расчетов интенсивностей свечения 10 полос Чемберлена. Для полосы, излучаемой при спонтанном переходе (2) с  $v'-v'' = 6-4$ , при расчете с коэффициентом Эйнштейна согласно Bates [1989] получаются значительно меньшие значения интенсивности свечения, чем в спектре, полученном с летательного аппарата [Broadfoot and Bellaire, 1999]. Поэтому в настоящей работе коэффициент Эйнштейна для этого перехода был увеличен в пять

раз. После использования измененного значения коэффициента Эйнштейна стало возможным получить пик свечения в районе 400 нм, как наблюдали [Broadfoot and Bellaire, 1999].

Согласие теоретически рассчитанных интенсивностей полос Чемберлена и Герцберга I с экспериментальными данными указывает на тот факт, что полученные из эксперимента данные по свечению молекулярных полос могут быть использованы при оценке скоростей образования и гашения различных колебательных уровней электронно-возбужденных состояний при различных столкновительных процессах. В данном случае лучшее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными удалось получить благодаря коррекции квантовых выходов  $q_v^A$  и  $q_v^A$ , которые в работе [Кириллов, 2012] аппроксимировались аналитической формулой (7).

Аналогично на рис. 4а представлены значения спектра свечения ночного неба в диапазоне длин волн 370–440 нм, измеренного спектрографом “EbertFastie” (Национальная обсерватория Китт-

**Таблица 1.** Квантовые выходы  $q_{v'}$  колебательного уровня  $v'$  согласно работе [Кириллов, 2012] и измененные в данной работе

	$v'$	Энергия $E_{v'}$ (см <sup>-1</sup> )	$q_{v'}$ [Кириллов, 2012]	Измененные $q_{v'}$
$A^3\Sigma_u^+$	0	35010.2	3.23E-06	3.27E-06
	1	35784.6	7.77E-05	7.77E-05
	2	36528.6	9.87E-04	9.87E-04
	3	37239.6	7.07E-03	<b>9.43E-03</b>
	4	37914.9	3.03E-02	<b>4.04E-02</b>
	5	38551.0	8.22E-02	8.22E-02
	6	39143.3	1.51E-01	1.51E-01
	7	39686.0	2.00E-01	<b>1.93E-01</b>
	8	40171.6	2.06E-01	<b>1.81E-01</b>
	9	40589.5	1.79E-01	1.88E-01
	10	40925.8	1.42E-01	1.42E-01
	Сумма:		1.00E+00	1.00E+00
$A^3\Delta_u$	0	34386.7	1.68E-07	1.68E-07
	1	35174.4	1.00E-05	1.00E-05
	2	35933.1	1.30E-04	1.30E-04
	3	36660.9	1.43E-03	<b>7.15E-03</b>
	4	37354.7	9.03E-03	<b>1.40E-02</b>
	5	38011	3.49E-02	3.49E-02
	6	38626.1	8.75E-02	8.75E-02
	7	39194.4	1.51E-01	<b>1.71E-01</b>
	8	39712.8	1.95E-01	<b>1.82E-01</b>
	9	40171.1	1.99E-01	1.99E-01
	10	40561.2	1.76E-01	1.76E-01
	11	40872.7	1.44E-01	1.44E-01
	Сумма:		1.00E+00	1.00E+00

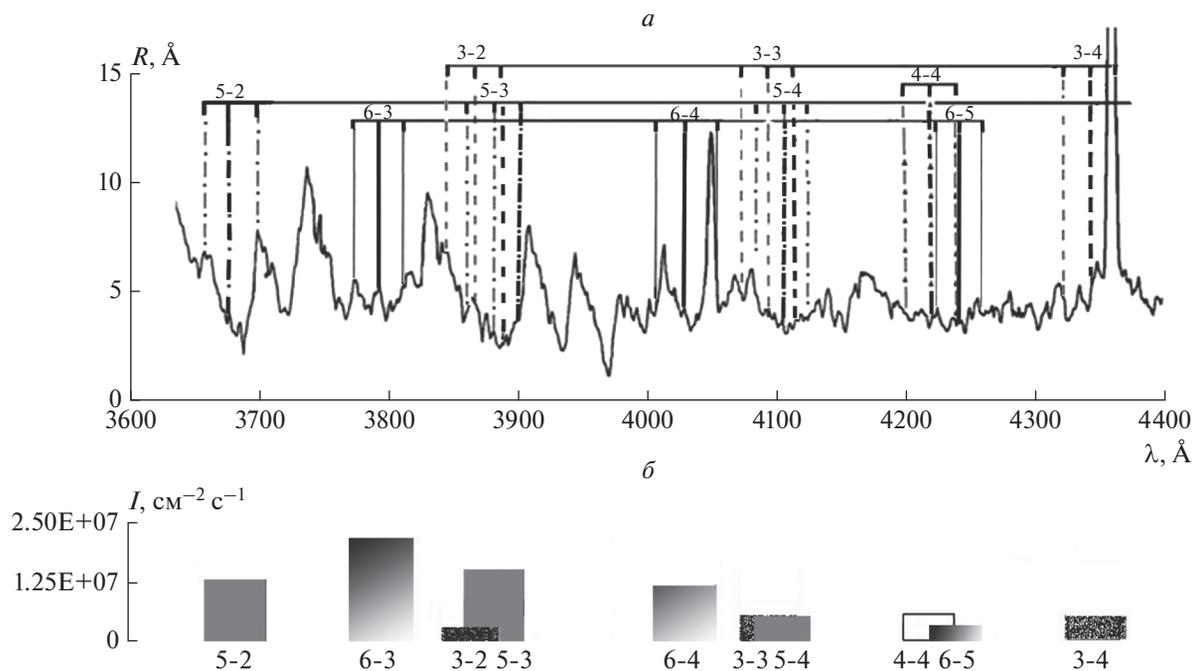
*Примечание.* Жирным шрифтом выделены измененные значения квантовых выходов  $q_{v'}$ .

Пик, США, Аризона) на высоте 2080 м [Broadfoot and Kendall, 1968]. В УФ-длинах волн (310–450 нм) использовался ультрафиолетовый источник низкой яркости [Broadfoot and Hunten, 1964]. Обсерватория функционирует с 1958 г., однако, авторы Broadfoot and Kendall [1968] описывают наблюдения, ссылаясь на измерения 1961–1964 гг. в период низкой солнечной активности. Теоретически рассчитанные значения 10 полос Чемберлена представлены на рис. 4б. Как видно из сравнения панелей а и б рис. 4, рассчитанные интенсивности 10 полос Чемберлена удовлетворительно повторяют экспериментальные данные.

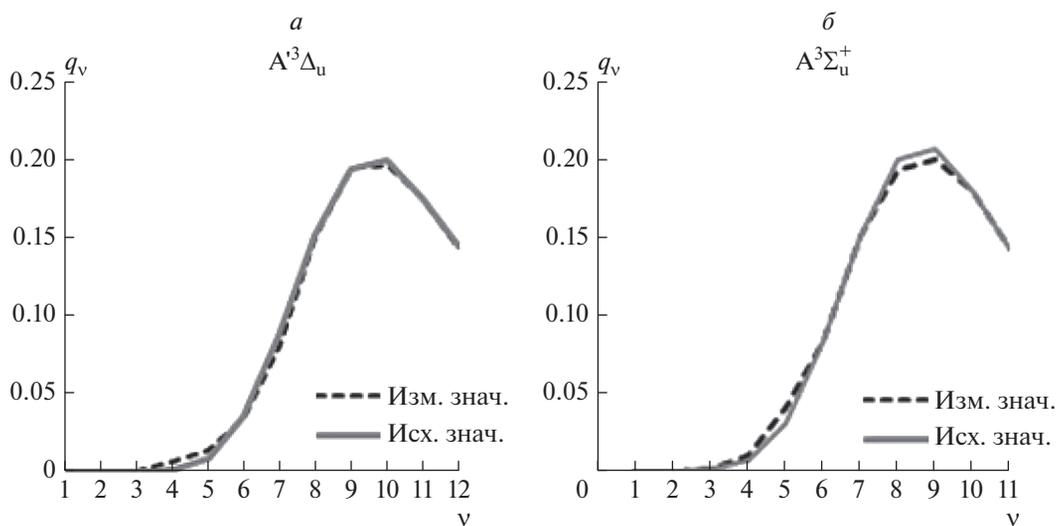
В данном случае удовлетворительного согласия результатов расчетов интенсивностей полос свечения молекулярного кислорода с экспериментальными данными, полученными с шаттла “Дискавери” (STS-53) [Broadfoot and Bellaire, 1999]

и в obs. Китт-Пик [Broadfoot and Kendall, 1968], удалось добиться благодаря коррекции квантовых выходов  $q_{v'}$ , которые в работе [Кириллов, 2012] аппроксимировались аналитической формулой (8). В большинстве случаев спектральных измерений (как и в работах [Broadfoot and Bellaire, 1999; Broadfoot and Kendall, 1968]), 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.

Рассчитанные значения  $q_{v'}^A$  и  $q_{v'}^B$  при тройных столкновениях (1) согласно Кириллов [2012] и измененные в настоящей работе значения представлены в табл. 1 и на рис. 5а, б. Жирным шриф-



**Рис. 4.** (а) – Фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне длин волн 370–440 нм, измеренного спектрографом “EbertFastie” (обс. Китт-Пик) на высоте 2080 м [Broadfoot and Kendall, 1968],  $Y$ –интенсивности ( $R/\text{Å}$ ),  $X$ – длины волн  $\lambda$  ( $\text{Å}$ ), цифры над пиками –  $(v'-v'')$  при излучательных переходах (2); (б) – Рассчитанные значения интенсивности излучения для различных полос Чемберлена с учетом измененных квантовых выходов  $q_{v'}^A$ .



**Рис. 5.** (а) – Значения исходных и измененных квантовых выходов для состояния  $A^3\Delta_u$ . По оси  $Y$ – квантовые выходы  $q_{v'}^A$ , по оси  $X$ – колебательные уровни  $v'$ ; (б) – Значения исходных и измененных квантовых выходов для состояния  $A^3\Sigma_u^+$ . По оси  $Y$ – квантовые выходы  $q_{v'}^A$ , по оси  $X$ – колебательные уровни  $v'$ .

том в табл. 1 выделены измененные значения. Измененные значения  $q_{v'}^A$  и  $q_{v'}^A$  на рис. 5а, б представлены штриховыми линиями.

В таблице 2 приведены интенсивности излучения полос Чемберлена и Герцберга I  $I_{v,v'}$  ( $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ) для колебательных уровней  $v' = 3-8$  излучатель-

**Таблица 2.** Интенсивности излучения полос Чемберлена и полос Герцберга I (в рэляях,  $1P = 10^6$  фотон/см<sup>2</sup> с) для колебательных уровней  $v' = 3-8$ 

Колебательный уровень $v'$	3	4	5	6	7	8	Отношение суммарной интенсивности полос Чемберлена к интенсивности полос Герцберга I
Полосы Чемберлена	14.5	42.6	69.2	92.9	108	60.7	42%
Полосы Герцберга I	39.9	103	218	248	206	114	

ных переходов (2) и (3) для октября 1976 и 1986 гг., при низкой солнечной активности  $F10.7 = 75$ . Из табл. 2 видно, что интенсивность излучения рассмотренных полос Чемберлена составляет ~40% от интенсивности излучения полос Герцберга I, на что было указано авторами работ [Broadfoot and Bellaire, 1999; Slanger and Copeland, 2003].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены значения интенсивности излучения полос Чемберлена и Герцберга I, обусловленных излучательными переходами с колебательных уровней  $v' = 3-6$  электронно-возбужденного кислорода  $O_2(A^3\Delta_u)$  и с колебательных уровней  $v' = 3-8$  электронно-возбужденного кислорода  $O_2(A^3\Sigma_u^+)$  для низкой ( $F10.7 = 75$ , 1976 и 1986 гг.) солнечной активности для средних широт. Проведено сравнение рассчитанных значений интенсивности излучения полос Чемберлена в условиях низкой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 370–440 нм спектрографом с космического шаттла [Broadfoot and Bellaire, 1999] и в обс. Китт-Пик [Broadfoot and Kendall, 1968] в тех же условиях. Кроме того, для условий низкой солнечной активности проведено сравнение рассчитанных значений интенсивности излучения полос Герцберга I с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 250–360 нм спектрографом с космического шаттла [Broadfoot and Bellaire, 1999]. Сравнение экспериментальных данных с рассчитанными значениями интенсивностей полос показало, что лучшее согласие наблюдается после коррекции значений квантовых выходов колебательных уровней  $q_v^{A'}$  состояния  $A^3\Delta_u$  и колебательных уровней  $q_v^A$  состояния  $A^3\Sigma_u^+$  в результате тройных столкновений (1), которые были представлены в работе [Кириллов, 2012].

Показано, что соотношение рассчитанных значений интенсивностей излучения полос Чемберлена и Герцберга I с колебательных уровней  $v' = 3-8$  состояний  $A^3\Delta_u$  и  $A^3\Sigma_u^+$  соответствует соотношению значений, представленных в публи-

кациях [Broadfoot and Bellaire, 1999; Slanger and Copeland, 2003], т.е. интенсивность свечения полос Чемберлена составляет ~40% от интенсивности свечения полос Герцберга I.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антоненко О.В., Кириллов А.С. Моделирование спектра свечения ночного неба Земли для систем полос, излучаемых при спонтанных переходах между различными состояниями молекулы электронно-возбужденного кислорода // Изв. РАН. Сер. физическая. Т. 85. № 3. С. 310–314. 2021.
- Кириллов А.С. Моделирование населенностей колебательных уровней состояний молекулярного кислорода, исходных для полос Герцберга, на высотах нижней термосферы и мезосферы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 52. № 2. С. 258–264. 2012.
- Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н. Деактивация колебательных состояний молекул гидроксила атомарным и молекулярным кислородом в области мезопаузы // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 38. № 6. С. 642–645. 1998.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм в ночное время. 1. Интенсивность // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 37. № 2. С. 81–90. 1997.
- Семенов А.И., Шефов Н.Н. Вариации температуры и содержания атомарного кислорода в области мезопаузы и нижней термосферы при изменении солнечной активности // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 39. № 4. С. 87–91. 1999.
- Семенов А.И., Перцев Н.Н., Шефов Н.Н., Перминов В.И., Баканас В.В. Расчет высотных профилей температуры и концентрации атмосферы на 30–110 км // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 44. № 6. С. 835–840. 2004.
- Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики // М.: ГЕОС. 741 с. 2006.
- Bates D.R. Oxygen band system transition arrays // Planet. Space Sci. V. 37. № 7. P. 881–887. 1989.
- Broadfoot A.L., Bellaire P.J., Jr. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow // J. Geophys. Res. V. 104. № A8. P. 17 127–17 138. 1999.
- Broadfoot A.L., Hunten D.M. Excitation of  $N_2$  band systems in aurora // Can. J. Phys. V. 42. № 6. P. 1212–1230. 1964.

- *Broadfoot A.L., Kendall K.R.* The Airglow Spectrum, 3100–10,000 Å // *J. Geophys. Res.* V. 73. № 1. P. 426–428. 1968.
- *Kirillov A.S.* Electronic kinetics of main atmospheric components in high-latitude lower thermosphere and mesosphere // *Ann. Geophys.* V. 28. № 1. P. 181–192. 2010.
- *Kirillov A.S.* The calculation of quenching rate coefficients of O<sub>2</sub> Herzberg states in collisions with CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> molecules // *Chem. Phys. Lett.* V. 592. P. 103–108. 2014.
- *Krasnopolsky V.A.* Excitation of the oxygen nightglow on the terrestrial planets // *Planet. Space Sci.* V. 59. № 8. P. 754–756. 2011.
- *Slanger T.G., Copeland R.A.* Energetic oxygen in the upper atmosphere and the laboratory // *Chem. Rev.* V. 103. № 12. P. 4731–4765. 2003.
- *Shefov N.N., Semenov A.I., Pertsev N.N.* Dependencies of the amplitude of the temperature enhancement maximum and atomic oxygen concentration in the mesopause region on seasons and solar activity level // *Phys. Chem. Earth Pt B.* V. 25. № 5–6. P. 537–539. 2000.