

УДК 537.877

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА O_2^* В ПОЛОСАХ ГЕРЦБЕРГА I В СВЕЧЕНИИ НОЧНОГО НЕБА ЗЕМЛИ

© 2023 г. О. В. Антоненко¹, *, А. С. Кириллов¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

*E-mail: antonenko@pgia.ru

Поступила в редакцию 17.09.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Представлены рассчитанные сезонные высотные распределения объемной интенсивности $i_{\nu\nu'}$ ($\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) ночного свечения молекулярного кислорода в полосах Герцберга I в диапазоне длин волн 255–365 нм в атмосфере Земли для низкой и для высокой солнечной активности. Также приведены результаты расчетов интегральной светимости $I_{\nu\nu'}$ ($\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S036767652270051X, EDN: AJJUZC

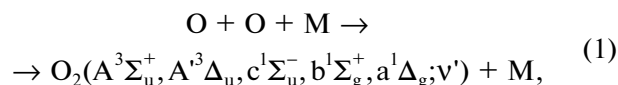
ВВЕДЕНИЕ

Возникновение видимого и ультрафиолетового излучения в газовой среде обусловлено электронно-возбужденными атомами и молекулами, а в случае инфракрасного излучения и колебательно-возбужденными молекулами, образование которых связано с различными фотохимическими процессами. Это и химические реакции, в результате которых возникают возбужденные атмосферные составляющие, и процессы неупругих столкновений с электронами и другими частицами с высокой кинетической энергией.

При расчете интенсивностей излучения возбужденных реагентов необходимо учитывать взаимодействие с окружающими компонентами среды. Одним из показателей при расчете является соотношение вероятности излучательного перехода в нижележащее состояние, характеризующейся коэффициентом Эйнштейна $A_{\nu\nu'}$, где ν' — индекс верхнего возбужденного уровня, ν'' — индекс нижнего возбужденного уровня, и частоты неупругих столкновений. В разреженных средах, когда частоты столкновений намного меньше вероятностей излучательных переходов, неупругими столкновениями можно пренебречь. Однако на высотах мезосферы и нижней термосферы излучательные и столкновительные времена жизни электронно-возбужденных молекул становятся сравнимыми, поэтому при расчете интенсивностей свечения молекул на данных высотах необходимо учитывать как вероятности спонтанных переходов, так и скорости неупругих взаимодей-

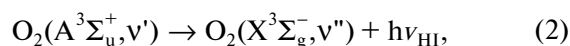
ствий, при которых происходит тушение электронного возбуждения.

Процессы рекомбинации атомарного кислорода на высотах мезосферы и нижней термосферы во время тройных столкновений приводят к образованию электронно-возбужденных молекул O_2



где M — третья частица при столкновении. При спонтанных переходах в электронно-возбужденных молекулах кислорода происходит свечение O_2 во многих полосах, что сказывается на излучательном балансе атмосферы на данных высотах [1]. Атомы кислорода образуются в атмосфере Земли в дневное время при фотодиссоциации молекул O_2 солнечным УФ излучением.

Электронно-возбужденный молекулярный кислород $O_2(A^3\Sigma_u^+)$, образующийся посредством (1) в атмосфере Земли, является источником свечения молекулярного кислорода в полосах Герцберга I (HI) в ночной атмосфере Земли



где ν' — колебательные уровни $A^3\Sigma_u^+$ состояния, ν'' — колебательные уровни основного $X^3\Sigma_g^-$ состояния. Тройные столкновения (1) с образованием $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ наиболее эффективны на высотах 80–110 км в атмосфере Земли [1]. Измерения ин-

тенсивностей свечения O_2 в полосах Герцберга I проводились как во время наземных измерений [2, 3], во время ракетных запусков в верхнюю атмосферу [4, 5], так и с помощью космического корабля “Дискавери” [6].

В работе [7] были получены значения интегральной светимости молекулярного кислорода I ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) в полосах Герцберга I, обусловленных излучательными переходами с колебательных уровней $v' = 3-8$ электронно-возбужденного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ для условий низкой ($F_{10.7} = 75$, 1976 и 1986 гг.) солнечной активности для средних широт. Было проведено сравнение рассчитанных значений интегральной светимости молекулярного кислорода в полосах Герцберга I в условиях низкой солнечной активности [7] с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 260–360 нм спектрографом с космического корабля “Дискавери” (STS 53) [6] в условиях низкой солнечной активности. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с данными, полученными как с космического шаттла, так и наземными наблюдениями.

Цель данной работы – провести сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения O_2^* в полосах Герцберга I с экспериментальными данными по ночному свечению молекулярного кислорода O_2^* в атмосфере Земли, полученными как наземными измерениями [2], так и с помощью космического корабля “Дискавери” (STS 53) [6]. При этом расширен диапазон колебательных уровней $v' = 3-9$ электронно-возбужденного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$, с которых происходит излучение O_2^* в полосах Герцберга I.

ПРОФИЛИ КОНЦЕНТРАЦИЙ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫСОТАХ МЕЗОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ

В настоящей работе используются экспериментальные данные о характерных концентрациях [O] на основании характеристик свечения атомарного кислорода O для различных месяцев года в условиях низкой ($F_{10.7} = 75$, 1976 и 1986 гг.) и высокой ($F_{10.7} = 203$, 1980 и 1981 гг.) солнечной активности на средних широтах (55.7° с.ш.; 36.8° в.д., по данным, основанным на измерениях звенигородской обсерватории Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН). Регулярные данные по свечению атомарного кислорода O были получены из полуэмпирической модели, интегрирующей несколько типов различных среднеширотных измерений, регрессионных соотношений и теоретических расчетов на протяжении нескольких десятков лет сотрудниками ИФА [1]. В соответствии с

основными сезонными закономерностями вариаций интенсивности эмиссии 557.7 нм высота и значение максимума концентрации атомарного кислорода значительно изменяются как в зависимости от месяца наблюдений, так и от солнечной активности [1, 8]. Увеличение солнечной активности приводит к росту значений максимума концентрации O и к уменьшению его высоты [9]. Кроме того, вариации интенсивности эмиссии 557.7 нм и высоты максимума концентраций атомарного кислорода наблюдаются как для зависимости от солнечной активности, так и в зависимости от сезона [10, 11].

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

В работе [1] также были представлены результаты анализа [12, 13] отклика среднемесячных значений температуры средней атмосферы на солнечную активность на основе многолетних данных, полученных с помощью ракет и спектрофотометрии ряда эмиссий ее собственного излучения в течение нескольких циклов 11-летней солнечной активности. На основе этих данных, используя разности температур для различных высот профилей, соответствующих годам высокой и низкой солнечной активности, в линейном приближении можно найти скорость приращения температуры под воздействием солнечной активности:

$$\Delta T(Z) = \delta T_F(Z)(F_{10.7} - 130)/100, \quad (\text{K}), \quad (3)$$

где $\delta T_F(Z)$ – изменение температуры на высоте Z при изменении $\Delta F_{10.7} = 100$ sfu (solar flux unit), единица измерения потока радиоизлучения на длине волны 10.7 см составляет 1 sfu = $10^{-22} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Гц}^{-1}$. После определения величин $\delta T_F(Z)$ для отдельных уровней высот были построены сезонные вариации температур [1]. Высотные профили скоростей изменения температур средней атмосферы на различных высотах от солнечной активности свидетельствуют об их выраженной высотной нелинейности. Существенное сезонное различие влияния солнечной активности в области мезопаузы, очевидно, обусловлено различием высотных распределений температуры в зависимости от времени года [1].

На рис. 1 представлены результаты исследований [1] на основе эмпирической модели отклика температуры на солнечную активность от высоты и времени года, цифрами указаны месяцы: 1 –

январь, 4 – апрель, 7 – июль, 10 – октябрь. По оси X : $\delta T_f(Z)$, $K(100 \text{ sfu})^{-1}$ – значения отклика температуры атмосферы на солнечную активность при $F_{10.7} = 100 \text{ sfu}$; по оси Y : Z – значения высоты в км. Таким образом, высотные распределения отклика температуры на солнечную активность на высотах 30–100 км указывают, что значительные сезонные вариации температуры наблюдаются на высотах ≈ 80 –95 км, а минимальные – на высотах ≈ 55 –70 км. Это наглядно видно из рис. 1.

В настоящей работе рассмотрены процессы возбуждения электронно-возбужденного молекулярного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ в атмосфере Земли на высотах свечения ночного неба в полосах Герцберга I с учетом вариации температуры, представленной на рис. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА В ПОЛОСАХ ГЕРЦБЕРГА I В СПЕКТРЕ СВЕЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА ЗЕМЛИ

На рис. 2 схематично представлены несколько спонтанных излучательных переходов с различных колебательных уровней электронно-возбужденного состояния $A^3\Sigma_u^+$ на различные колебательные уровни основного состояния $X^3\Sigma_g^-$, при которых происходит излучение O_2^* в полосах 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 λ полос Герцберга I можно рассчитать по формуле:

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

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

Поскольку переходы между рассмотренными нами состояниями дипольно-запрещенные, то характерные излучательные времена состояний $A^3\Sigma_u^+$ порядка 0.1 с, согласно [14]. Поэтому при расчетах концентраций электронно-возбужденного кислорода необходимо учесть гашение молекулы $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ не только при излучательных переходах (2), но и при столкновениях с основными атмосферными составляющими N_2 и O_2 на данном диапазоне высот [7, 15]:

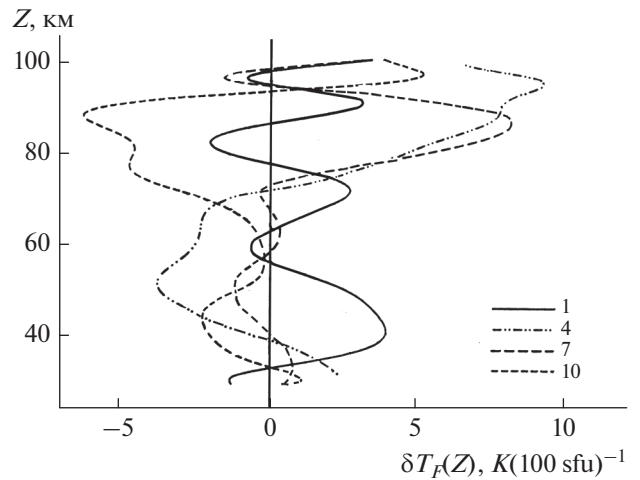
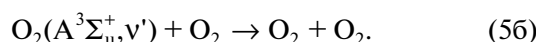
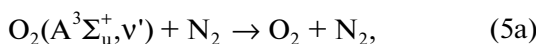


Рис. 1. Модель отклика температуры на солнечную активность от высоты и времени года [1], (1 – январь, 4 – апрель, 7 – июль, 10 – октябрь). По оси X : $\delta T_f(Z)$, $K(100 \text{ sfu})^{-1}$ – значения отклика температуры атмосферы на солнечную активность при $F_{10.7} = 100 \text{ sfu}$; по оси Y : Z – значения высоты в км.

Так как концентрации N_2 на высотах 90–100 км превышают 10^{13} см^{-3} , а константы гашения состояния $A^3\Sigma_u^+$ больше $\sim 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [16, 17], то столкновительные времена жизни рассматриваемых колебательных уровней данных состояний либо сравнимы, либо намного меньше излучательных на высотах ночного свечения O_2^* в полосах Герцберга I. Это означает, что кинетику состояний Герцберга на рассматриваемом диапазоне высот атмосферы необходимо рассматривать с учетом столкновительных процессов.

Проведены расчеты концентрации возбужденного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ на высотах верхней атмосферы Земли для колебательных уровней $v' = 3$ –9 данного состояния для октября месяца, 1976 и 1986 гг. (низкая солнечная активность, $F_{10.7} = 75$) [7]. Расчет концентрации электронно-возбужденного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ производился согласно формуле:

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

где α_A – квантовый выход состояния $A^3\Sigma_u^+$ при тройных столкновениях (1), $q_{v'}^A$ – квантовые выходы колебательных уровней v' этого состояния, k_1 – константа скорости реакции рекомбинации при тройных столкновениях (1), k_{5a} , k_{5b} – константы скоростей реакций (5a), (5b), $A_{v'}^A$ – сумма

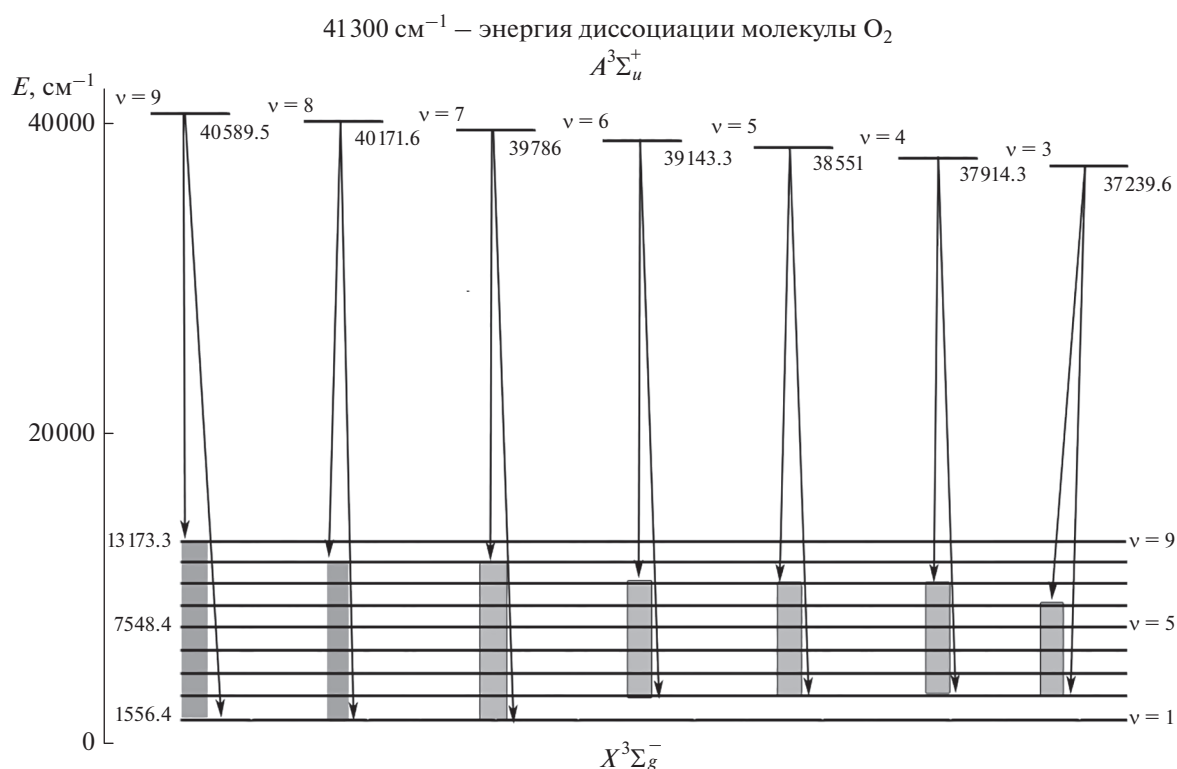


Рис. 2. Электронные переходы внутри молекулы O_2 .

коэффициентов Эйнштейна для всех спонтанных излучательных переходов с колебательных уровней v' состояния $A^3\Sigma_u^+$.

Константа скорости реакции рекомбинации $k_1(\text{cm}^6 \text{c}^{-1})$ применялась как рассчитанная величина в зависимости от температуры атмосферы на рассмотренном интервале высот согласно [1]; константы гашения электронно-возбужденного кислорода при столкновениях молекулярного кислорода $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+)$ с атмосферными составляющими N_2 и O_2 , $k_{3a}(\text{cm}^3 \cdot \text{c}^{-1})$, $k_{3b}(\text{cm}^3 \cdot \text{c}^{-1})$, учитывались согласно [16, 17]; квантовый выход α_A – согласно [18], коэффициенты Эйнштейна для всех спонтанных переходов – согласно [14]. В работе [7] квантовые выходы $q_{v'}^A$ были оценены на основании сравнения рассчитанных интенсивностей O_2^* в полосах Герцберга I и измеренных с космического шаттла “Дискавери” (STS-53) [6], поэтому в настоящих расчетах мы используем $q_{v'}^A$ согласно [7].

Согласно формуле (6) проведен расчет профилей высотного распределения концентраций электронно-возбужденного молекулярного кислорода $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+)$ в верхней атмосфере Земли.

Значения объемных интенсивностей излучения O_2^* в полосах, соответствующих переходам (2), были рассчитаны по формуле:

$$i_{v',v''}(\text{cm}^{-3} \text{c}^{-1}) = [\text{O}_2^*] A_{v',v''}, \quad (7)$$

где $[\text{O}_2^*](\text{cm}^{-3})$ – рассчитанная концентрация электронно-возбужденного кислорода O_2^* в зависимости от высоты h [7], $A_{v',v''}(\text{c}^{-1})$ – коэффициент Эйнштейна [14], соответствующий спонтанному излучательному переходу с колебательного уровня v' вышележащего состояния на колебательный уровень v'' нижележащего состояния в (2) (см. рис. 2).

На рис. 3а и 3б представлены высотные распределения атомарного кислорода O для различных месяцев года для условий высокой ($F_{10.7} = 203, 1980$ и 1981 гг.) и низкой ($F_{10.7} = 75, 1976$ и 1986 гг.) солнечной активности на средних широтах (55.7°N ; 36.8°E), полученные по данным Звенигородской обсерватории Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН). Рассчитанные высотные распределения объемных интенсивностей излучения O_2^* в полосе Герцберга I, связанной со спонтанным переходом $A^3\Sigma_u^+(v' = 6) \rightarrow X^3\Sigma_g^-(v'' = 3)$, для условий высокой ($F_{10.7} = 203$,

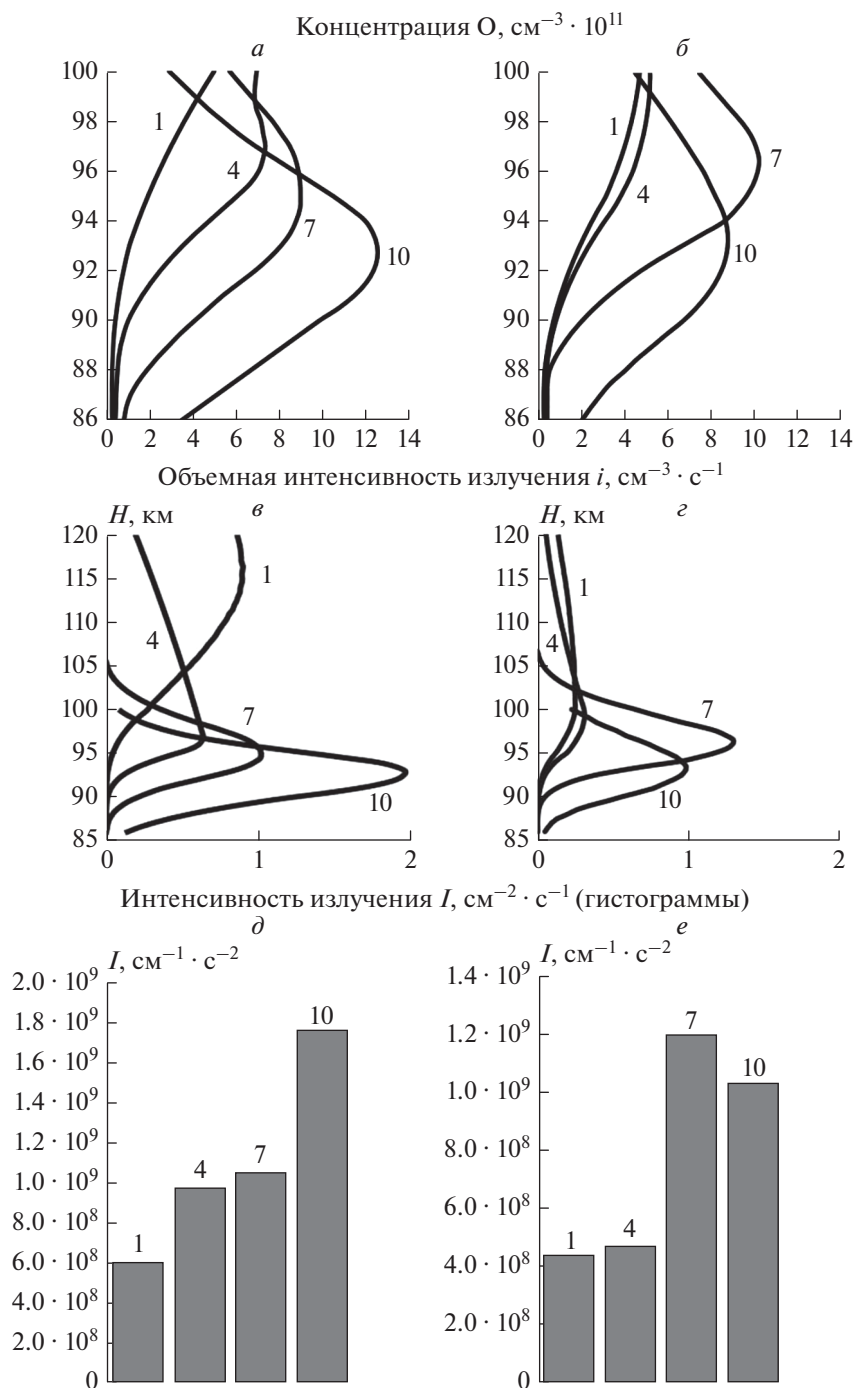


Рис. 3. Высотные распределения атомарного кислорода O для различных месяцев года для условий высокой ($F_{10.7} = 203, 1980$ и 1981 гг.) и низкой ($F_{10.7} = 75, 1976$ и 1986 гг.) солнечной активности на средних широтах (55.7° с.ш.; 36.8° в.д.), полученные по данным звенигородской обсерватории Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН [1] (а). Высотные распределения объемных интенсивностей излучения O_2^* в полосах, связанных со спонтанным переходом $A^3\Sigma_u^+(v''=6) \rightarrow X^3\Sigma_g^-(v''=3)$, для условий низкой ($F_{10.7} = 75, 1976$ и 1986 гг.) и высокой ($F_{10.7} = 203, 1980$ и 1981 гг.) солнечной активности на средних широтах Земли (б). Рассчитанные значения интенсивности излучения O_2^* I ($\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) (гистограммы) в различных полосах Герцберга I, обусловленных излучательными переходами (2) для условий низкой ($F_{10.7} = 75, 1976$ и 1986 гг.) и высокой ($F_{10.7} = 203, 1980$ и 1981 гг.) солнечной активности на средних широтах Земли (в). Цифрами представлены месяцы года: 1 – январь, 4 – апрель, 7 – июль, 10 – октябрь. По осям X приведены высотные распределения атомарного кислорода O (а, б); значения объемной интенсивности излучения i ($\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) (в, г), по осям Y отложены высоты в км.

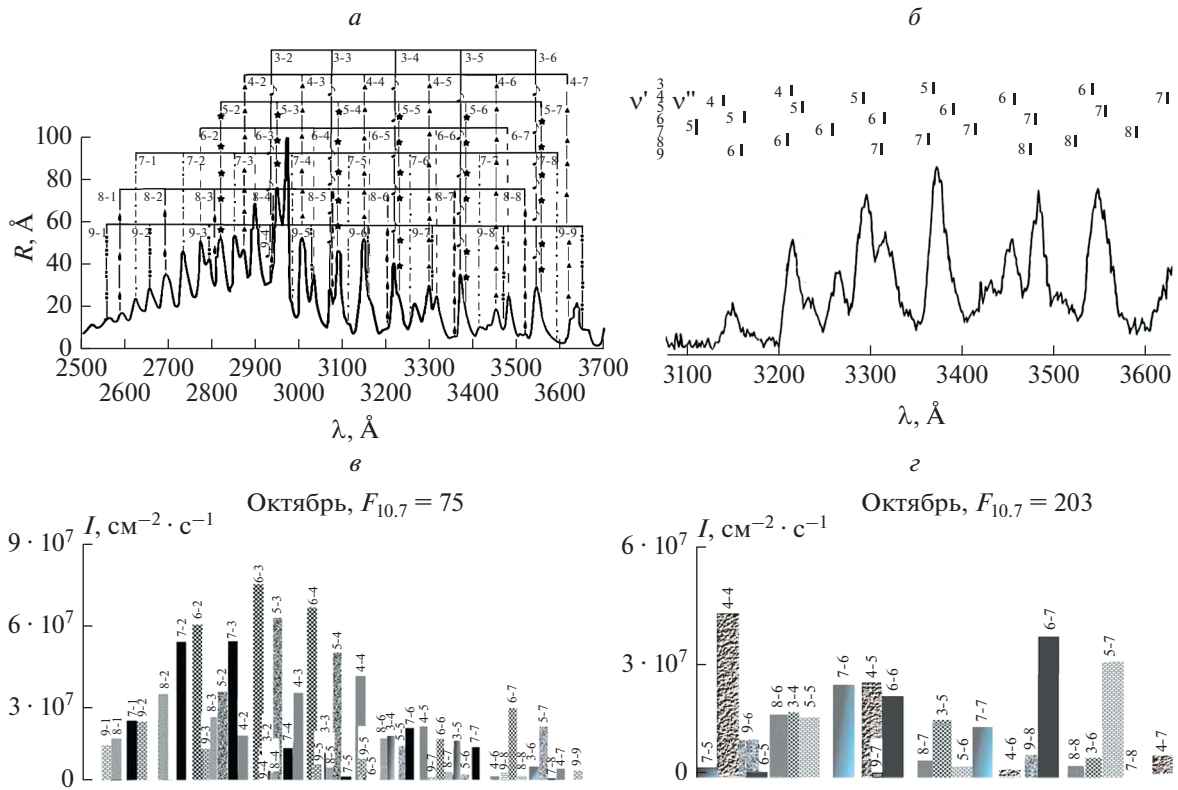


Рис. 4. Фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 250–360 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла [6]: Y – интенсивности ($R/\text{Å}$), X – длины волн λ (Å), цифры над пиками – (v' – v'') при излучательных переходах (2) (а). Рассчитанные значения интенсивности излучения O_2^* в различных полосах Герцберга I (б). Спектр излучения O_2^* в ночной верхней атмосфере в диапазоне УФ длин волн 305–395 нм, в полосах Герцберга I, полученный наземными наблюдениями [2] (в). Рассчитанные значения интенсивности излучения O_2^* в полосах Герцберга I (д).

1980 и 1981 гг.) и низкой ($F_{10.7} = 75$, 1976 и 1986 гг.) солнечной активности на средних широтах Земли представлены на рис. 3в и 3г. Рассчитанные значения интенсивности излучения O_2^* ($I(\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})$) (гистограммы) во всех рассмотренных полосах Герцберга I, обусловленных излучательными переходами (2), для условий высокой ($F_{10.7} = 203$, 1980 и 1981 гг.) и низкой ($F_{10.7} = 75$, 1976 и 1986 гг.) солнечной активности представлены на рис. 3 (д, е). Цифрами на рис. 3 представлены месяцы года: 1 – январь, 4 – апрель, 7 – июль, 10 – октябрь. При расчетах использовались данные по концентрациям атомарного кислорода и температурам для средних месяцев каждого сезона.

Как видно из сравнения рис. 3а и 3б с 3в и 3г, вариации значений объемной интенсивности свечения O_2^* для высокой и низкой солнечной активности коррелируют с вариациями в концентрациях атомарного кислорода. Результирующие гистограммы по каждому месяцу (рис. 3д и 3е) демонстрируют, что для низкой солнечной актив-

ности ($F_{10.7} = 75$, 1976 и 1986 гг.) максимальное значение объемной интенсивности свечения O_2^* наблюдается для июля, в то время как для высокой ($F_{10.7} = 203$, 1980 и 1981 гг.) – для октября, что видно из рис. 3а, 3б, 3д, 3е.

На рис. 4а представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 250–370 нм, 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) [6]. По осям Y отложены значения интенсивностей в рэлях/ангстрем ($R/\text{Å}$) ($1 R = 10^6$ фотон/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$), по осям X отложены длины волн в ангстремах ($\lambda(\text{Å})$). Каждая двойка цифр над пиками свечения обозначает колебательные уровни (v' – v'') состояний $A^3\Sigma_u^+$ и $X^3\Sigma_g^-$ при излучательных переходах (2).

Рассчитанные значения интенсивности излучения O_2^* ($I(\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})$) (гистограммы) в различных

полосах Герцберга I, обусловленных излучательными переходами (2), выполнены для октября 1976 и 1986 гг. (условия низкой солнечной активности $F_{10.7} = 75$) в этом же диапазоне длин волн. Результаты расчетов приведены на рис. 4б, 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. При этом в отличие от результатов [7] учтены излучательные переходы с девятого колебательного уровня $v' = 9$ состояния $A^3\Sigma_u^+$ и приведены интенсивности свечения O_2^* в полосах Герцберга I (9-1) и (9-2), расположенные в диапазоне 255–270 нм. Это сравнение позволяет идентифицировать полосы 256 и 267 нм, измеренные с космического шаттла “Дискавери” (STS-53) [6]. Как видно из рис. 4а и 4б, наблюдается хорошее согласие рассчитанных интенсивностей излучения возбужденного кислорода $O_2^*(A^3\Sigma_u^+, v' = 3-9)$ со спектром, полученным с космического шаттла, т.е. с экспериментальными данными свечения ночного неба в диапазоне 250–360 нм.

На рис. 4в представлены результаты, полученные в наземных многолетних измерениях спектра излучения ночной верхней атмосферы в диапазоне УФ длин волн 305–365 нм, т.е. полосы Герцберга I [2]. Наблюдения были выполнены в период высокой солнечной активности стандартными советскими спектрографами 1950–1960 гг. СП48, СП49, СП50 [1].

Теоретически рассчитанные значения интенсивностей свечения O_2^* в полосах Герцберга I для периода высокой солнечной активности представлены на рис. 4г. Как видно из сравнения рис. 4в и 4г, рассчитанные интенсивности свечения O_2^* в полосах Герцберга I хорошо повторяют экспериментальные данные в диапазоне 320–365 нм. Резкое уменьшение измеренных интенсивностей свечения O_2^* в полосах [2] для длин волн меньше 320 нм связано, по-видимому, либо с сильным поглощением озоновым слоем, либо аппаратурной функцией использованных спектрографов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью расчетов получены значения интенсивности излучения $O_2^* i_{v'v''}$ ($\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) в полосах Герцберга I, обусловленных излучательными переходами с колебательных уровней $v' = 3-9$ электронно-возбужденного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ для условий низкой ($F_{10.7} = 75$, 1976 и 1986 гг.) и высокой ($F_{10.7} = 203$, 1958 и 1959 гг.) солнечной активности для средних широт. Проведено сравне-

ние рассчитанных значений интенсивности излучения O_2^* в полосах Герцберга I в условиях низкой солнечной активности с данными, полученными в диапазоне длин волн 250–370 нм спектрографом на борту космического шаттла “Дискавери” (STS-53) [6] в условиях низкой солнечной активности. При этом учтены излучательные переходы с $A^3\Sigma_u^+$, $v' = 9$, что позволило идентифицировать полосы 256 и 267 нм, измеренные на борту космического шаттла. Проведено сравнение рассчитанных значений интенсивности излучения O_2^* в полосах Герцберга I в условиях высокой солнечной активности с данными, полученными в диапазоне длин волн 305–365 нм стандартными наземными советскими спектрографами 1950–1960 гг. [2]. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с данными, полученными как с космического шаттла, так и наземными наблюдениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
2. Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.T. // Planet. Space Sci. 1962. V. 9. No. 12. P. 883.
3. Broadfoot A.L., Kendall K.R. // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. No. 1. P. 426.
4. Siskind D.E., Sharp W.E. // Planet. Space Sci. 1990. V. 38. No. 9. P. 1399.
5. Kita K., Iwagami N., Ogawa T. // Planet. Space Sci. 1992. V. 40. No. 9. P. 1269.
6. Broadfoot A.L., Bellaire P.J. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. No. A8. Art. No. 17127.
7. Антоненко О.В., Кириллов А.С. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 310; Antonenko O.V., Kirillov A.S. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 219.
8. Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н. // Геомагн. и аэроном. 1998. Т. 38. № 6. С. 642.
9. Семенов А.И., Шефов Н.Н. // Геомагн. и аэроном. 1999. Т. 39. № 4. С. 87.
10. Семенов А.И., Шефов Н.Н. // Геомагн. и аэроном. 1997. Т. 37. № 2. С. 81.
11. Shefov N.N., Semenov A.I., Pertsev N.N. // Phys. Chem. Earth B. 2000. V. 25. No. 5–6. P. 537.
12. Семенов А.И., Перцев Н.Н., Шефов Н.Н. и др. // Геомагн. и аэроном. 2004. Т. 44. № 6. С. 835.
13. Pertsev N.N., Semenov A.I., Shefov N.N. // Proc. 17th ESA Symp. Eu. Rock. Ball. Program. Rel. Res. (Sandefjord, 2005). P. 245.
14. Bates D.R. // Planet. Space Sci. 1989. V. 37. No. 7. P. 881.
15. Кириллов А.С. // Геомагн. и аэроном. 2012. Т. 52. № 2. С. 258.
16. Kirillov A.S. // Ann. Geophys. 2010. V. 28. No. 1. P. 181.
17. Kirillov A.S. // Chem. Phys. Lett. 2014. V. 592. P. 103.
18. Krasnopolsky V.A. // Planet. Space Sci. 2011. V. 59. No. 8. P. 754.

Investigation of the glow of the Herzberg I band of molecular oxygen in the Earth's night sky

O. V. Antonenko^{a, *}, A. S. Kirillov^a

^a Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

*e-mail: antonenko@pgia.ru

The calculated seasonal altitude distributions of the volumetric intensity $i_{\nu\nu}$ ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) of the luminescence of the Herzberg I band of molecular oxygen in the Earth's atmosphere at night depending on the altitude for high and low solar activity are presented. The calculated volume intensity values demonstrate that the greatest seasonal variations are observed at altitudes of $\approx 87\text{--}97$ km for both high and low solar activity. The results of calculations of the integrated luminosity $I_{\nu\nu}$ ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) are also presented, while the volumetric radiation intensity values are recalculated into integral values using the approximation of an optically thin layer. It is shown that the calculation results are in good agreement with the experimental data obtained from both the space shuttle and ground-based observations.