УДК 533

ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ (ПОЛОС ГЕРЦБЕРГА І) В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ, ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ И СЕЗОНОВ ГОДА

© 2022 г. О. В. Антоненко^{а,} *, А. С. Кириллов^а

^аПолярный геофизический институт, улица Академгородок, дом 26 а, Апатиты, 184209 Россия

*e-mail: antonenko@pgia.ru Поступила в редакцию 06.04.2022 г. После доработки 25.07.2022 г. Принята к публикации 11.08.2022 г.

Рассмотрены процессы возбуждения и гашения электронно-возбужденного молекулярного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ в атмосфере Земли на высотах свечения ночного неба. Полосы Герцберга I диапазоне 250–360 нм имеют широкий спектр свечения в ночном небе Земли. Проведены расчеты профилей объемных интенсивностей свечения полос Герцберга I молекулярного кислорода в атмосфере Земли в ночное время. При расчете использованы данные полуэмпирической модели отклика температуры средней атмосферы в зависимости от высоты, времени года и солнечной активности на средних широтах Земли. Выполнено сравнение расчетов интенсивностей свечения полос Герцберга I с экспериментальными данными, полученными с космического шаттла "Дискавери" (STS-53) и со стандартных спектрографов СП-48, СП-49, СП-50 50х–60х годов прошлого столетия. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными как с космического шаттла, так и наземными наблюдениями.

Ключевые слова: концентрации атомарного кислорода, расчеты интенсивностей свечения **DOI:** 10.31857/S0002351522060025

1. ВВЕДЕНИЕ

Верхняя атмосфера Земли (выше 80 км) является весьма разреженной газовой средой, основными компонентами которой являются атомы и молекулы азота и кислорода, а также водород и гелий. Так называемые малые компоненты – окись азота, окись углерода и т.д., а также метастабильные атомы и молекулы являются важными являются важными для фотохимии и излучения верхней атмосферы. В результате воздействия ионизирующего ультрафиолетового излучения Солнца в верхней атмосфере происходят многочисленные фотохимические процессы, следствием которых является собственное излучение атмосферы [1]. В этой области высот происходит диссоциация молекулярного кислорода солнечным УФ излучением. Процессы рекомбинации атомарного кислорода приводят к образованию электронно-возбужденных молекул О2, которые обуславливают множество эмиссий и влияют на излучательный баланс этой области [1]. Известно, что одним из источников свечения ночной атмосферы Земли является электронно-возбужденный молекулярный кислород O_2 ($A^3 \Sigma_u^+$), образующийся при тройных столкновениях в атмосфере Земли с участием двух атомов O и третьей частицы

$$O + O + M \rightarrow O_2(A^3 \Sigma_u^+; v') + M, \qquad (1)$$

где v' — колебательные уровни $A^{3}\Sigma_{u}^{+}$ состояния, M — третья частица при столкновении. Атомы кислорода образуются в атмосфере Земли в дневное время при фотодиссоциации молекул O₂ солнечным УФ излучением O₂ + $hv \rightarrow$ O + O. Тройные столкновения (1) с образованием O₂($A^{3}\Sigma_{u}^{+}$) наиболее эффективны в слое атмосферы Земли толщиной около 10 км с центром на высоте около 90 км [1, 2]. В дальнейшем электронно-возбужденная молекула кислорода переходит из состояния $A^{3}\Sigma_{u}^{+}$ в основное состояние $X^{3}\Sigma_{g}^{-}$, излучая при этом полосы Герцберга I. В настоящей работе рассмотрены процессы возбуждения и гашения

электронно-возбужденного молекулярного кис-

лорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$. При этом следует отметить, что полосы Герцберга I в диапазоне 250—360 нм имеют широкий спектр свечения в собственном излучении верхней атмосферы Земли в ночное время.

$$O_2(A^{3}\Sigma_{u}^{+}, v') \to O_2(X^{3}\Sigma_{g}^{-}, v'') + hv_{HI}.$$
 (2)

В настоящей работе используются экспериментальные данные о характерных концентрациях [О] в вышеуказанном слое на основании характеристик свечения атомарного кислорода О 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° N; 36.8° E), звенигородская обсерватория Института физики атмосферы (ИФА) им. А.М. Обухова РАН). Регулярные данные по свечению атомарного кислорода 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 средних широтах эмиссия 557.7 нм возбуждается главным образом в высотной области 85-115 км с максимумом интенсивности на ~97 км. Увеличение солнечной активности приводит к росту концентрации О в максимуме слоя и к опусканию его нижней границы [4]. Полученные в [1, 3] 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 концентраций атомарного кислорода и их значениями. 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 [5, 6]. В результате изменения профилей концентраций атомарного кислорода неизбежно изменяются профили скоростей образования электронно-возбужденного молекулярного кислорода О₂^{*} в атмосфере Земли в результате процесса тройных столкновений (1) и интенсивности свечения различных полос молекулярного кислорода. Поэтому интенсивности свечения полос Герцберга I будут зависеть как от времени года, так и от солнечной активности. Кроме того, в работе [1] также были представлены результаты анализа 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. Анализ был выполнен в работе [7]. 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:

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

где $\delta T_F(Z) = dt/df$ – изменение температуры на высоте Z при $\Delta F_{10.7} = 100 \, sfu$. 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 абсцисс: $\delta T/\delta F_{10.7}$, K (100 sfu)⁻¹ – значения отклика температуры атмосферы на солнечную активность при $F_{10.7} = 100 \, sfu;$ по оси ординат: — 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.

Цель данной работы — провести сравнение результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения полос Герцберга I в диапазоне 250— 360 нм с экспериментальными данными об интенсивности ночного свечения молекулярного кислорода O_2^* в собственном излучении верхней атмосферы Земли в ночное время. Особое внимание уделено особенностям образования различных колебательных уровней *v*' электронно-возбужденного состояния $A^3 \Sigma_u^+$ молекулы кислорода

2. ОПИСАНИЕ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ВОЗБУЖДЕННОГО КИСЛОРОДА О₂(А³Σ_U)

в результате тройных столкновений (1).

На рис. 2 схематично представлены несколько спонтанных излучательных переходов с различных колебательных уровней электронно-возбуж-



Рис. 1. Модельные высотные распределения отклика температуры на солнечную активность для 4х месяцев года (1 -январь, 4 -апрель, 7 -июль. 10 -октябрь) на высотах 30–100 км [1]. По оси абсцисс: $\delta T / \delta F_{10.7}$, К ($100 \ sfu$)⁻¹ – значения отклика температуры атмосферы на солнечную активность при $F_{10.7} = 100 \ sfu$; по оси ординат: значения высоты в км.



41300 см $^{-1}$ – энергия диссоциации молекулы O_2

Рис. 2. Электронные переходы внутри молекулы О2.

денного состояния $A^{3}\Sigma_{u}^{+}$ на различные колебательные уровни основного 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 см⁻¹ = 1 эВ). Длину волны λ полос Герцберга I можно рассчитать по формуле:

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

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 1 и 0.1 секунды, соответственно [8]. 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 [9]:

$$O_2(A^3\Sigma_u^+, v') + N_2 \to O_2 + N_2,$$
 (5a)

$$O_2(A^3\Sigma_u^+, v') + O_2 \to O_2^+ O_2.$$
 (56)

Так как концентрации N_2 на высотах 90–100 км превышают 10¹³ см⁻³, а константы гашения состояния $A^{3}\Sigma_{\mu}^{+}$ больше ~ 10^{-12} см³ с⁻¹ [9, 10], то столкновительные времена жизни рассматриваемых колебательных уровней данных состояний либо сравнимы, либо намного меньше излучательных на высотах ночного свечения полос Герцберга I. Это означает, что кинетика состояний Герцберга I на рассматриваемом диапазоне высот атмосферы во многом определяется столкновительными процессами. 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) [12]. Расчет концентрации электронно-возбужденного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^{\scriptscriptstyle +})$ про-

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

изводился согласно формуле:

где α_A — квантовый выход состояния $A^3\Sigma_u^+$ при тройных столкновениях (1), а $q_{v'}^A$ — квантовые выходы колебательных уровней v' этого состояния, k_1 — константа скорости реакции рекомбинации при тройных столкновениях (1), k_{5a} , k_{56} — константы скоростей реакций (5а), (5б), $A_{v'}^A$ — сумма коэффициентов Эйнштейна для всех спонтанных излучательных переходов с колебательных уровней v' состояния $A^3\Sigma_u^+$. Константа скорости реакции рекомбинации $k_1(см^6 c^{-1})$ применялась как рассчитанная величина в зависимости от температуры атмосферы на рассмотренном интервале высот согласно [1]; константы гашения электронно-возбужденного кислорода при столкновениях молекулярного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ с атмосферными составляющими N_2 и O_2 , $k_{5a}(cm^3 c^{-1})$, $k_{56}(cm^3 c^{-1})$, учитывались согласно [9, 10]; квантовые выходы $\alpha_{A'}$ и α_A – согласно [13], коэффициенты Эйнштейна для всех спонтанных переходов – согласно [8]. Аналитическая формула для расчета кван-

товых выходов $q_{v'}^{A}$ была представлена в [9]:

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

где $E_0 = 40000 \text{ см}^{-1}$, $\beta = 1500 \text{ см}^{-1}$ – параметры, определенные методом наименьших квадратов путем сравнения рассчитанных колебательных населенностей состояния $A^3 \Sigma_u^+$ с результатами наземных наблюдений. Однако в работе [12] квантовые выходы q_{v}^A были скорректированы на основании сравнения рассчитанных интенсивностей полос Герцберга I, измеренных с космического шаттла "Дискавери" (STS-53). В настоящей работе мы используем q_{v}^A согласно [11].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ ПОЛОС ГЕРЦБЕРГА І

Согласно формуле (6) проведен расчет профилей высотного распределения концентраций электронно-возбужденного молекулярного кислорода O_2^* для состояния $A^3 \Sigma_u^+$ 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 [7]. Разработанная этими авторами методика расчета высотных профилей температуры и суммарной концентрации атмосферы позволяет определять значения температуры и плотности атмосферы на средних широтах для заданных гелиогеофизических условий (высота, уровень солнечной активности, номер года). Значения объемных интенсивностей излучения полос, соответствующих переходам (2), были рассчитаны по формуле:

$$i_{v'v''}(cM^{-3}c^{-1}) = [O_2^*]A_{v'v''},$$
 (8)

где $[O_2^*]$ (см⁻³) — рассчитанная концентрация электронно-возбужденного кислорода O_2^* в зависимости от высоты *h* [12], $A_{v'v''}$ (с⁻¹) –коэффициент Эйнштейна, соответствующий спонтанному



Рис. 3. Рассчитанные высотные распределения объемной интенсивности излучения $i_{v'v''}$ (см⁻³ с⁻¹) Герцберга I (а) для высокой солнечной активности, (б) для низкой солнечной активности для различных месяцев года (1 – январь, 2 – апрель, 3 – июль, 4 – октябрь) на средних широтах Земли. По осям абсцисс приведены значения объемной интенсивности излучения *i*(см⁻³ с⁻¹), по осям ординат отложены высоты в км.

излучательному переходу с колебательного уровня *v*' вышележащего состояния на колебательный уровень *v*" нижележащего состояния в (2) [8]. На рис. 3 показаны рассчитанные высотные распределения объемных интенсивностей излучения полос, связанных со спонтанным переходом $A^{3}\Sigma_{u}^{+}(v'=6) \rightarrow X^{3}\Sigma_{g}^{-}(v''=3)$ (3а, 3б), для условий низкой ($F_{10.7} = 75$, 1976 и 1986 гг.) (3а) и высокой ($F_{10.7} = 203$, 1980 и 1981 гг.) (36) 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 и температурам для средних месяцев каждого сезона. По осям абсцисс приведены значения

ИЗВЕСТИЯ РАН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА том 58 № 6 2022



Рис. 4. (а) Фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 250-360 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла [2]: по оси ординат – значения релей/ангстрем (R/Å), по оси абсцисс – длины волн λ (Å), цифры над пиками – (v'-v'') при излучательных переходах (2). (б) Рассчитанные значения интенсивности излучения для различных полос Герцберга I.

объемной интенсивности излучения $i(cm^{-3} c^{-1})$, по осям ординат отложены высоты в км. На рисунке 4(а) представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 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 года (условия низкой солнечной активности) [2]. По осям ординат отложены значения интенсивностей в рэлеях/ангстрем (R/Å) (1 P = 10^6 фотон/см² с), по осям абсцисс отложены длины волн в ангстремах $(\lambda(A))$. Каждая двойка цифр над пиками свечения обозначает колебательные уровни (v'-v") при излучательных переходах (2). Рассчитанные значения интенсивности излучения $I(cm^{-2} c^{-1})$ (гистограммы) для различных полос Герцберга I, обусловленных излучательными переходами (2), выполнены для октября 1976 и 1986 г.г. (условия низкой солнечной активности F_{10.7} =75) в этом же диапазоне длин волн. Результаты расчетов приведены на рис. 46, 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 [12] учтены излучательные переходы с девятого колебательного уровня v' = 9 состо-

яния $A^{3}\Sigma_{u}^{+}$ и приведены интенсивности полос Герцберга I (9-1) и (9-2), расположенные в диапазоне 255—270 нм. Как видно из рис. 4, наблюдается хорошее согласие рассчитанных интенсивностей полос излучения возбужденного кислорода

 $O_2^*(A^3\Sigma_u^+, v' = 3-9)$ со спектром, полученным с шаттла [2] – экспериментальными данными свечения ночного неба в диапазоне 250–360 нм. На рис. 5а представлены результаты, полученные наземными многолетними измерениями спектра излучения ночной верхней атмосферы в диапазоне УФ длин волн 305–395 нм, т.е. полосы Герцберга I [14]. Наблюдения были выполнены в период вы-



Рис. 5. (а) Спектр излучения ночной верхней атмосферы в диапазоне УФ длин волн 305–395 нм, полосы Герцберга I, полученный наземными наблюдениями [14]. (б) Рассчитанные значения интенсивности излучения полос Герцберга I.

сокой солнечной активности стандартными советскими спектрографами 50х-60х годов прошлого столетия СП-48, СП-49, СП-50 [1]. Теоретически рассчитанные значения интенсивностей свечения полос Герцберга I для периода высокой солнечной активности представлены на рис. 5б. Как видно из сравнения рис. 5а и 56, рассчитанные интенсивности полос Герцберга I хорошо повторяют экспериментальные данные. Сравнение теоретически рассчитанных интенсивностей полос Герцберга I с экспериментальными данными [14] позволяет идентифицировать максимумы в полученных спектрах: максимум на 315 нм обусловлен полосой (4-4); 321-323 нм - полосы (3-4) и (5-5); 327-332 нм – полосы (7-6), (4-5) и (6-6); 337 нм – полосы (3-5) и (5-6); 342–348 нм – полосы (7-7), (4-6) и (6-7); 355 нм – полосы (3-6) и (5-7).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено схематично несколько спонтанных излучательных переходов (рис. 2) 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 полос Герцберга I. Проведены расчеты концентрации возбужденного кислорода $O_{2}(A^{3}\Sigma_{u}^{+})$ на высотах верхней атмосферы Земли для колебательных уровней v' = 3-9 данного состояния. При расчетах концентраций электронно-возбужденного кислорода учтено 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: 85–100км [9]. Получены значения интенсивности излучения полос Герцберга I, обусловленные излучательными

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 сравнение интенсивности излучения полос Герцберга I в условиях низкой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазо-

переходами с колебательных уровней v' = 3-9

не длин волн 250—360 нм спектрографом с космического шаттла на протяжении его 12-дневной миссии STS 53 в сентябре 1995 г. (года низкой солнечной активности) [2]. Результатом сравнения рассчитанных значений с экспериментальными данными является хорошее согласие рассчитанных интенсивностей полос излучения воз-

бужденного кислорода $O_2^*(A^3\Sigma_u^+, v' = 3-9)$ со спектром, полученным с шаттла [2] – экспериментальными данными свечения ночного неба в лиапазоне 250-360 нм. что видно из рис. 4. Проведено так же сравнение рассчитанных значений интенсивности излучения полос Герцберга I в условиях высокой солнечной активности с экспериментальными данными, полученными в диапазоне длин волн 305-395 нм стандартными наземными советскими спектрографами 50х-60х годов прошлого столетия [14]. Результаты, полученные этими многолетними измерениями спектра излучения ночной верхней атмосферы хорошо согласуются с рассчитанными значениями интенсивности излучения полос Герцберга І. Сравнение теоретически рассчитанных интенсивностей полос Герцберга I с экспериментальными данными [14] позволяет идентифицировать максимумы в полученных спектрах: максимум на 315 нм обусловлен полосой (4-4); 321-323 нм - полосы (3-4) и (5-5); 327-332 нм – полосы (7-6), (4-5) и (6-6); 337 нм – полосы (3-5) и (5-6); 342–348 нм – полосы (7-7), (4-6) и (6-7); 355 нм – полосы (3-6) и (5-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Шефов Н.Н., Семёнов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы индикатор ее структуры и динамики // М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
- Broadfoot A.L., Bellaire P.J., Jr. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. № A8. P. 17127-17138.
- 3. Перминов В.И., Семёнов А.И., Шефов Н.Н. Дезактивация колебательных состояний молекул гидроксила атомарным и молекулярным кислородом в области мезопаузы // Геомагнетизм и Аэрономия. 1998 Т. 38. № 6. С. 642–645.

- 4. Семёнов А.И., Шефов Н.Н. Вариации температуры и содержания атомарного кислорода в области мезопаузы и нижней термосферы при изменении солнечной активности // Геомагнетизм и Аэрономия. 1999. Т. 39. № 4. С. 8791.
- 5. Семёнов А.И., Шефов Н.Н. Эмпирическая модель вариаций эмиссии атомарного кислорода 557.7 нм в ночное время 1. Интенсивность // Геомагнетизм и Аэрономия. 1997. Т. 37. № 2. С. 8190.
- 6. *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. 2000. V. 25. № 5–6. P. 537–539.
- 7. 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 Аэрономия. 2004. Т. 44. № 6. С. 835–840.
- 8. *Bates D.R.* Oxygen band system transition arrays // Planet. Space Sci. 1989. V. 37. № 7. P. 881–887.
- Кириллов А.С. Моделирование населенностей колебательных уровней состояний молекулярного кислорода, исходных для полос Герцберга, на высотах нижней термосферы и мезосферы // Геомагнетизм и Аэрономия. 2012. Т. 52. № 2. С. 258–264.
- Kirillov A.S. Electronic kinetics of main atmospheric components in high-latitude lower thermosphere and mesosphere // Ann. Geophys. 2010. V. 28. № 1. P. 181–192.
- Kirillov A.S. The calculation of quenching rate coefficients of O₂ Herzberg states in collisions with CO₂, CO, N₂, O₂ molecules // Chem. Phys. Lett. 2014. V. 592. P. 103–108.
- 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. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 310–314.
- Krasnopolsky V.A. Excitation of the oxygen nightglow on the terrestrial planets // Planet. Space Sci. 2011. V. 59. № 8. P. 754–756.
- Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.T., Atlas of the airglow spectrum λλ 3000–12400 Å // Planet. Space Sci. 1962. V. 9. № 12. P. 883–915.

The Study of the Emissions of the Earth's Upper Atmosphere (Herzberg I Bands) Depending on Solar Activity, Atmospheric Temperature and Seasons of the Year

O. V. Antonenko^{1,} * and A. S. Kirillov¹

¹Polar Geophysical Institute, Academy town street, 26a, Apatity, 184209 Russia *e-mail: antonenko@pgia.ru

The processes of excitation and quenching of electronically excited molecular oxygen $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ in the Earth's atmosphere at night sky heights are considered. The Herzberg I bands in the range of 250–360 nm

have a wide spectrum of luminescence in the night sky of the Earth. The volume intensity profiles of the Herzberg I bands of molecular oxygen in the Earth's atmosphere during night are calculated. The calculation used the data of a semi-empirical model of the response of atomic oxygen concentrations and temperature of the middle atmosphere depending on altitude, season, and solar activity at the Earth's mid-latitudes. The calculations of the emission intensities of the Herzberg I bands are compared with the experimental data obtained from the Space Shuttle Discovery (STS-53) and from spectrographs SP-48, SP-49, SP-50 of the 50s-60s of the last century. It is shown that the results of the calculation are in good agreement with the experimental data obtained both from the space shuttle and ground-based observations.

Keywords: atomic oxygen concentrations, the calculations of the emission intensities