

УДК 537.877

ИНТЕНСИВНОСТИ НОЧНОГО СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛОС МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА

© 2024 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 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Выполнены расчеты интенсивности ночного свечения Атмосферных полос молекулярного кислорода $I_{\nu\nu'}$ ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$) в атмосфере Земли для различных сезонов в средних широтах и в области экватора и северных тропиков с учетом экспериментальных данных профилей концентраций атомарного кислорода на различных широтах. Рассчитанные интегральные интенсивности свечения Атмосферных полос сравниваются с экспериментальными данными, полученными с космического шаттла (транспортной системы STS), а также с телескопа Keck I. Показано, что наблюдается хорошее согласие результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными, но лучшее согласие достигается с данными, полученными с телескопа Keck I.

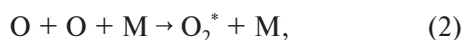
DOI: 10.31857/S0367676524030179, EDN: QLGZDS

ВВЕДЕНИЕ

Поглощаемая атмосферными газами энергия Солнца создает определенный тепловой режим в каждой области атмосферы Земли, а также влияет на химический состав на различных высотах атмосферы. Процесс фотодиссоциации молекул O_2 солнечным УФ-излучением

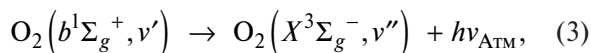


происходит на дневной стороне планеты и приводит к образованию повышенных концентраций атомарного кислорода. Затем, в результате тройных столкновений



где М — частица доминирующих в атмосфере газов, образуется молекула электронно-возбужденного кислорода O_2^* , которая излучает свет в различных полосах в результате спонтанных излучательных переходов на более низкие по энергии электронные состояния, регистрация которых происходит на ночной стороне Земли из-за отсутствия интенсивного дневного свечения.

В настоящей работе рассматривается интенсивность излучения Атмосферной системы полос (Атм)



где ν' — колебательные уровни $b^1\Sigma_g^+$ состояния; ν'' — колебательные уровни основного $X^3\Sigma_g^-$ состояния. Данная система полос регистрируется в инфракрасных спектрах свечения ночного неба в атмосфере Земли [1]. Необходимо подчеркнуть, что ночное и даже сумеречное ее излучение обладает весьма малой интенсивностью по сравнению с привычным окружающим дневным освещением. Это ставит достаточно высокие требования к выбору спектральной аппаратуры и необходимой ее чувствительности [1].

Высокое спектральное разрешение аппаратуры дает возможность с поверхности Земли наблюдать молекулярные полосы и измерять их интенсивность. Однако наземным наблюдениям присущи определенные ограничения из-за возможного поглощения и рассеяния излучения атмосферными газами. Поэтому спектрометрические измерения с космических аппаратов имеют большое значение для подобных исследований. Поддерживать эксперименты, сопоставимые и с наземными, и со спутниковыми, способна единственная космическая платформа — космический шаттл, или космическая транспортная система (STS) [2].

Цель данной работы — сравнение теоретических расчетов интенсивностей свечения Атмосферных полос молекулярного кислорода O_2^* в ночном небе Земли с экспериментальными данными, полученными как во время запуска

космического шаттла, так и с телескопа Кекс I (обсерватория Кека, пик Мауна-Кеа, Гавайи).

ПРОЦЕССЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

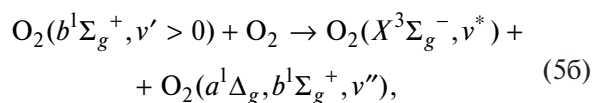
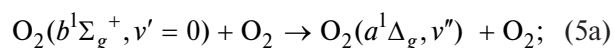
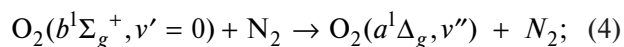
Возникновение видимого, ультрафиолетового и инфракрасного излучения в газовой среде атмосферы обусловлено различными фотохимическими процессами, которые приводят к образованию электронно-возбужденных молекул, а в случае инфракрасного излучения — и колебательно-возбужденных молекул. Одним из главных факторов, влияющих на интенсивность излучения, является вероятность радиационного перехода в нижележащее состояние, характеризующая коэффициентом Эйнштейна A . Величина A определяет радиационное время ($\tau = 1 / A$) жизни возбужденного состояния, в течение которого возбужденный компонент (в рассматриваемом случае кислород) переходит в другое состояние с излучением фотона.

При выпадении в атмосферу высокоэнергичных частиц (электронов и протонов) большую часть энергии частиц поглощает молекулярный азот N_2 . Образующийся в результате излучательных процессов и неупругих столкновений метастабильный азот $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ при взаимодействии с молекулами кислорода O_2 отдает часть своей энергии, тем самым увеличивая образование в атмосфере электронно-возбужденного молекулярного кислорода. В работах [3, 4] было проведено исследование кинетики состояний Герцберга $c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$, а также синглетных состояний $a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$ молекулярного кислорода на высотах верхней и средней атмосферы Земли во время выпадения в атмосферу высокоэнергичных частиц. Авторами [3, 4] была показана важная роль межмолекулярных процессов переноса энергии электронного возбуждения в кинетике молекулярного кислорода и образовании различных состояний электронно-возбужденных молекул O_2 .

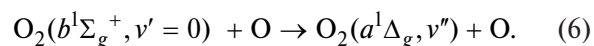
В случае тройных столкновений (2) у электронно-возбужденной молекулы кислорода также образуются несколько метастабильных состояний. Переходы с состояний Герцберга $A^3\Sigma_u^+$, $A^3\Delta_u$, приводящие к излучению в ультрафиолетовом диапазоне спектра, рассматривались в работах [5, 6]. Измерения ультрафиолетового свечения молекулярного кислорода в атмосфере Земли проводились в ходе эксперимента Arizona Airglow (GLO). Эксперимент GLO-1 космического корабля “Дискавери” проводился на протяжении его миссии STS-53 в 1992 г. (см. рис. 3 в [2]). В настоящей работе рассматриваются излучательные переходы с состояния $b^1\Sigma_g^+$ на $X^3\Sigma_g^-$, которые приводят к свечению Атмосферных полос O_2 , располагающихся в инфракрасном диапазоне. Поэтому в настоящей работе используются измерения инфракрасного свечения

молекулярного кислорода в атмосфере Земли, выполненные в ходе эксперимента Arizona Airglow (GLO) космического корабля “Индевор” на протяжении его 12-дневной миссии STS-69 в 1995 г. [2].

Время жизни молекул O_2 в этом метастабильном состоянии, так же как и в приведенных двух других состояниях Герцберга, определяется как коэффициентами Эйнштейна спонтанного излучения для процесса (3) [1], так и скоростями k_4 , k_{5a} , k_{5b} , k_6 неупругих столкновений с молекулами N_2 и O_2 :



а также атомами кислорода O:



Интенсивности полос Атмосферной системы различаются более чем на порядок между собой, причем наиболее интенсивной является полоса (0—0) 762 нм (переход $v' = 0 \rightarrow v'' = 0$). Полную интенсивность свечения данной полосы невозможно измерить с поверхности Земли по причине резонансного поглощения атмосферным молекулярным кислородом. Однако наблюдение без сильного поглощения возможно во время полета шаттла. Эта полоса в 22 раза ярче полосы (0—1) (865 нм), являющейся второй по значимости, которая регулярно измеряется наземными наблюдателями. Полоса (0—1) является характерной полосой Атмосферной системы O_2 в регистрируемом спектре ночного свечения [1, 2]. Другие полосы в излучении Атмосферной системы наблюдаются слабо и интенсивности их малы [7]. Исследование излучения полос этой системы в верхней атмосфере показало, что область высот свечения полос Атмосферной системы — порядка 90—100 км с максимумом излучения около 95 км [1].

РАСЧЕТЫ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СВЕЧЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ПОЛОС И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Расчет концентраций электронно-возбужденного кислорода для рассматриваемого состояния $O_2(b^1\Sigma_g^+, v')$ производился согласно формуле

$$[O_2^*] = \alpha q_v k_2 \times [O]^2 \times ([N_2] + [O_2]) / (A_v + k_4 \times [N_2] + (k_{5a} + k_{5b}) \times [O_2] + k_6 \times [O]), \quad (7)$$

где α — квантовый выход $b^1\Sigma_g^+$ состояния молекулы при тройных столкновениях (2) (для $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ мы полагаем $\alpha = 0.1$ согласно представленным в [8], табл. 2) значениям $\alpha = 0.08–0.15$; $q_{v'}$ — квантовые выходы колебательных уровней v' этого состояния ($q_0 = 0.1$, $q_1 = 0.78$, $q_2 = 0.12$). Значения квантовых выходов $q_{v'}$ для $b^1\Sigma_g^+$ подобраны таким образом, чтобы согласие теоретических расчетов с экспериментальными данными было наилучшим. При этом общая сумма значений квантовых выходов для указанного состояния должна быть равна 1 (единице); k_2 ($\text{см}^6\text{с}^{-1}$) — константа скорости реакции рекомбинации двух атомов кислорода при тройных столкновениях с частицами атмосферных составляющих; $k_4 = 2 \times 10^{-15} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$, $k_{5a} = 4 \times 10^{-17} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$, $k_{56}(v' = 1) = 8 \times 10^{-12} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$, $k_{56}(v' = 2) = 5 \times 10^{-13} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$ — константы скоростей реакций гашения электронно-возбужденного кислорода при неупругих столкновениях (4), (5a), (5б)

электронно-возбужденного молекулярного кислорода с атмосферными составляющими N_2 и O_2 , которые рассчитываются согласно [9, 10] для температуры $T = 195 \text{ K}$; $k_6 = 8 \times 10^{-14} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$, согласно [1]; $A_{v'}$ — сумма коэффициентов Эйнштейна для всех спонтанных излучательных переходов с колебательных уровней v' молекулы $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ согласно [1].

С использованием формулы (7) проведен расчет профилей высотного распределения концентраций электронно-возбужденного молекулярного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ в верхней атмосфере Земли. При выполнении расчетов было учтено влияние атомарного кислорода на процессы гашения $O_2(b^1\Sigma_g^+)$. Для профилей концентраций N_2 , O_2 и температуры использовалась модель MSIS-90.

На рис. 1a представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 620–900 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла “Индевор” (миссия STS-69). Значения

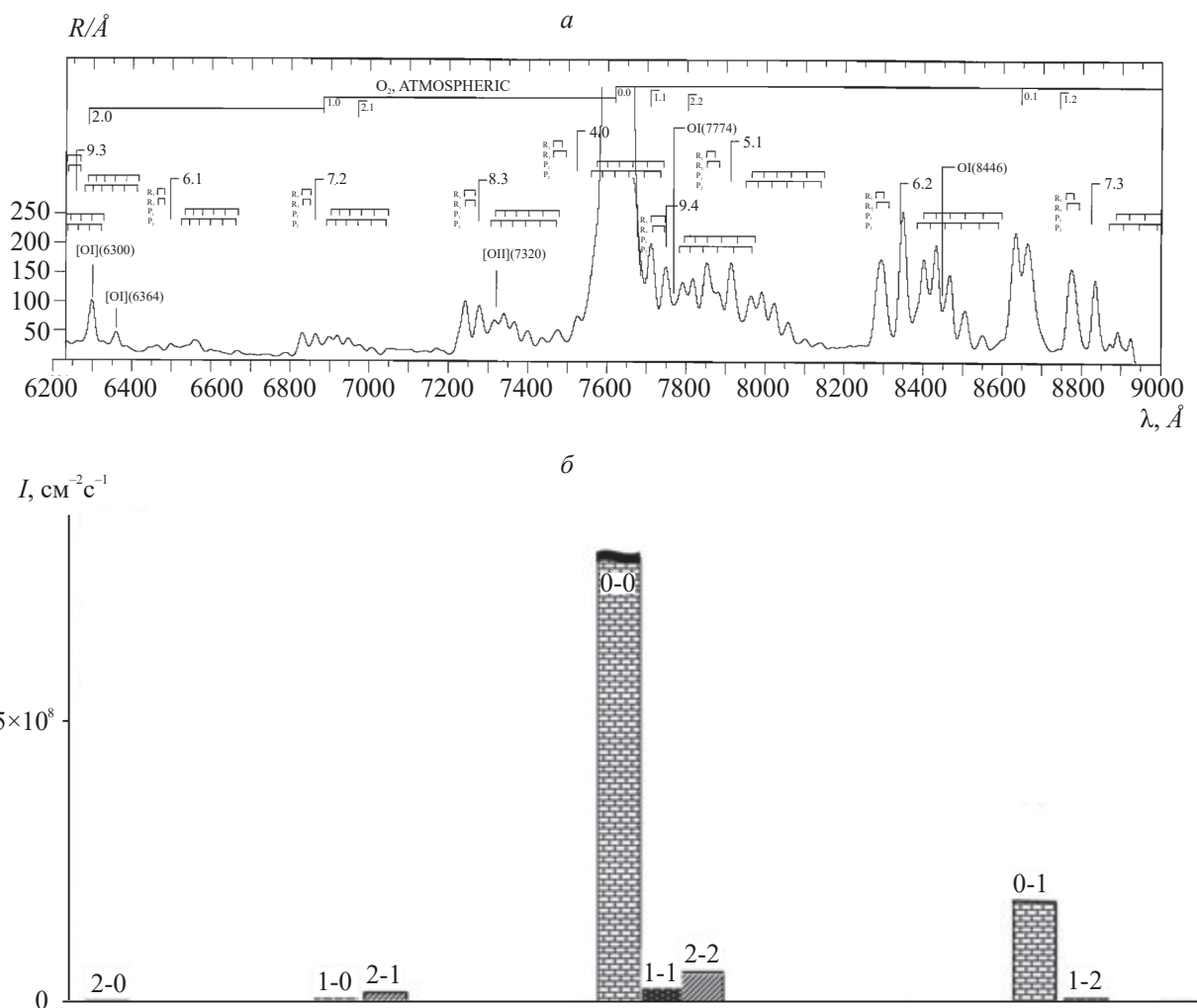


Рис. 1. Спектр свечения ночного неба в диапазоне 620–900 нм: данные с космического шаттла “Индевор” (STS-69) (a), рассчитанные значения интенсивности излучения O_2^* в Атмосферных полосах (гистограммы) в этом же диапазоне (б). Цифры над пиками — значения колебательных уровней ($v'-v''$) при излучательном переходе (3).

интенсивности излучения $I_{\nu\nu''}$ ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$) (гистограммы) для Атмосферных полос, обусловленных переходом (3), были рассчитаны и представлены на рис. 1б для этого диапазона длин волн для средних широт. При расчетах использовались модельные значения профилей концентраций атомарного кислорода [1, 11], полученные для полуночных условий на основе высотных профилей излучения $\text{O}(^1\text{S})$ 557.7 нм, приведенных к средней солнечной активности ($F_{10.7} = 130$) и невозмущенной геомагнитной активности ($K_p = 0$).

На рис. 2а рассчитанные значения интенсивности излучения $I_{\nu\nu''}$ ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$) (гистограммы) для Атмосферной системы полос для средних широт для октября месяца сравниваются с аналогичными данными измерений, выполненных спектрографом высокого разрешения (HIRES) на телескопе Кеск I (обсерватория Кека, пик Мауна-Кеа, Гавайи, США, 19° с.ш.) [7]. На рис. 2б представлены интенсивности свечения с колебательных уровней $\nu' = 0-2$, полученные в [7]. Авторы [7] отмечают, что с того времени, как вышеуказанный крупнейший оптический телескоп впервые увидел свет в 1993 г., началась новая эра в исследованиях Атмосферной системы полос молекулярного кислорода O_2 . Очевидно, что измерения с помощью этого телескопа ведутся с 1993 г., более точного периода представленных на рисунке измерений не указано, однако, автор описывает наблюдения, ссылаясь на труды 1994 г. [12] и 1996 г. [13], в то время как фрагмент усредненного спектра с космического шаттла, представленного [2], был выполнен в 1995 г. Следовательно, прослеживается некоторое соответствие периодов измерений.

Кроме того, в настоящей работе рассчитаны значения общей интегральной светимости $I_{\nu\nu''}$ ($\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$) Атмосферных полос в диапазоне 620–900 нм для экваториальной зоны и северных тропиков. В расчетах используются экспериментальные данные о характерных концентрациях $[\text{O}]$ в области экватора и северных тропиков Земли, полученные с помощью зондирования атмосферы на спутнике термосферно-ионосферно-мезосферной энергетики и динамики (TIMED) с использованием оптического спектрографа инфракрасной микроскопической системы OSIRIS [14]. На рис. 2в приведены гистограммы рассчитанных интенсивностей полос, обусловленных спонтанными излучательными переходами с колебательных уровней $\nu' = 0-2$, для экваториальной зоны и северных тропиков.

Гистограммы интенсивностей свечения всей системы Атмосферных полос на средних широтах (январь, апрель, июль, октябрь) представлены на рис. 3а. Аналогичные результаты для экваториальной зоны и северных тропиков (осень, зима, апрель, август) приведены на рис. 3б. Расчеты показали, что на средних широтах максимальные значения общей интегральной светимости получаются для октября, тогда как максимальные значения концентраций атомарного кислорода — на высоте 95 км в июле. Значительно ниже, на высоте 80–85 км, максимальные значения концентраций атомарного кислорода — именно в октябре. Для экваториальной зоны (включая северные тропики) максимальные значения общей интегральной светимости на высоте 95 км — в апреле, что соответствует повышенным значениям концентраций атомарного кислорода в этот период.

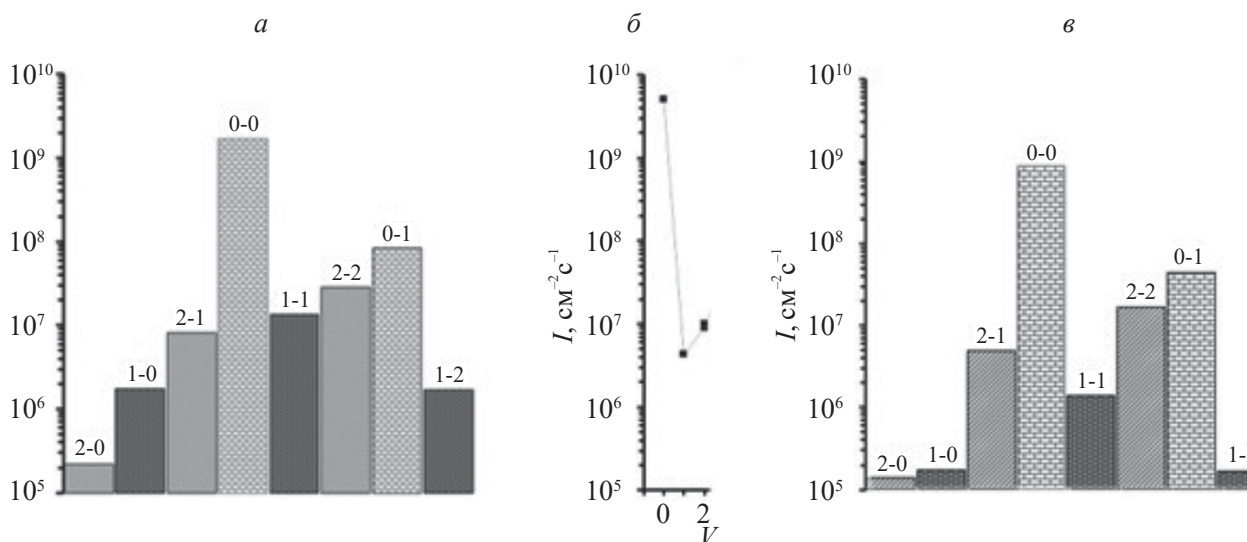


Рис. 2. Спектр свечения ночного неба в диапазоне 620–900 нм: рассчитанные значения интенсивности излучения O_2^* в Атмосферных полосах (гистограммы) для средних широт Земли (а), данные с телескопа Кеск I (б), результаты расчетов для экваториальной зоны, включая северные тропики (гистограммы) (в).

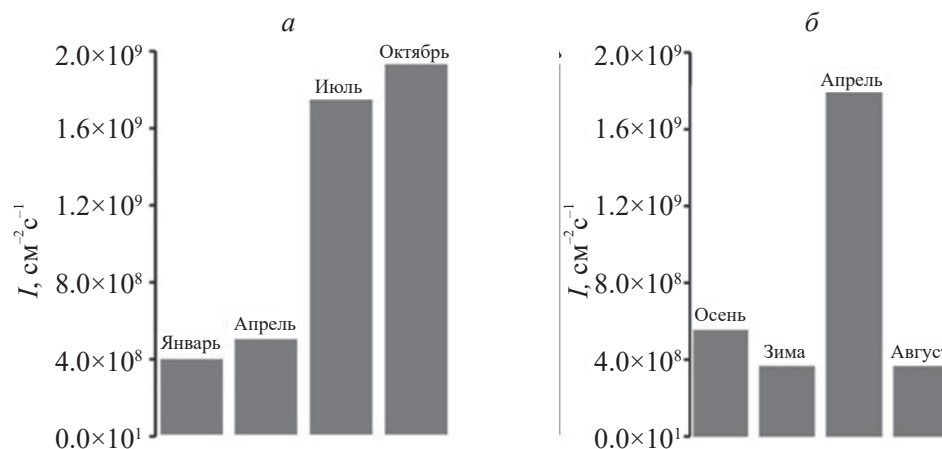


Рис. 3. Значения общей интегральной светимости $I, \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, всей системы Атмосферных полос: для средних широт Земли (а), для экваториальной зоны, включая северные тропики (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено сравнение рассчитанных значений интенсивностей свечения Атмосферных полос молекулярного кислорода в условиях низкой солнечной активности с данными, полученными в диапазоне длин волн 620—900 нм спектрографом на борту космического шаттла “Индевор” (STS-69) [2] и с помощью телескопа Кеск I [7]. При этом учтены излучательные переходы с $b^1\Sigma_g, v' = 0$, что позволило идентифицировать полосы 762 и 865 нм, измеренные как на борту космического шаттла, так и с помощью телескопа. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с данными, полученными с космического шаттла, но лучшее согласие достигается экспериментальными данными, полученными с телескопа Кеск I [7].

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.; Khomich V.Yu., Semenov A.I., Shefov N.N. Airglow as an indicator of upper atmospheric structure and dynamics. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 739 p.
2. Broadfoot A.L., Bellaire P.J. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. No. A8. P. 17127.
3. Кириллов А.С., Вернер Р., Гинева В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 361; Kirillov A.S., Werner R., Guineva V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 252.
4. Kirillov A.S., Belakhovsky V.B. // J. Geophys. Res. Atmos. 2021. V. 126. No. 5. Art. No. e2020JD033177.
5. 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.
6. Антоненко О.В., Кириллов А.С. // Геомагн. и аэроном. 2022. Т. 62. № 5. С. 661; Antonenko O.V., Kirillov A.S. // Geomagn. Aeronomy. 2022. V. 62. No. 5. P. 461.
7. Slanger T.G., Cosby P.C., Huestis D.L., Osterbrock D.E. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. No. D16. P. 20557.
8. Yankovsky V. // Adv. Space Res. 2023. V. 67. No. 3. P. 921.
9. Кириллов А.С. // Квант. электрон. 2012. Т. 42. № 7. С. 653; Kirillov A.S. // Quant. Electron. 2012. V. 42. No. 7. P. 653.
10. Kirillov A.S. // Chem. Phys. 2013. V. 410. P. 103.
11. Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н. // Геомагн. и аэроном. 1998. Т. 38. № 6. С. 642; Perminov V.I., Semenov A.I., Shefov N.N. // Geomagn. Aeron. 1998. V. 38. No. 6. P. 642.
12. Vogt S.S. // Opt. Engin. 1994. V. 2198. P. 362.
13. Osterbrock D.E., Fulbright J.P., Martel A.R. et al. // Publ. Astron. Soc. Pac. 1996. V. 108. P. 277.
14. Sheese P.E., McDade I.C., Gattinger R.L., Llewellyn E.J. // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art. No. D01303.

Intensities of Atmospheric bands of molecular oxygen in the nightglow

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

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

**e-mail: antonenko@pgia.ru*

The intensities of the Atmospheric bands of molecular oxygen $I_{\nu, \nu'}$ ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) in the nightglow of the Earth's atmosphere are calculated for different latitudes and seasons. The calculations were performed using experimental data on the profiles of atomic oxygen concentrations for different seasons. The calculated integral intensities of Atmospheric bands are compared with experimental data obtained from the space shuttle (STS transport system), as well as from the Keck I telescope. It is shown that there is good agreement between theoretical calculations and experimental data for the considered latitudes, but better agreement is received with data obtained from Keck I telescope.