

УДК 550.388

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НОЧНОГО СВЕЧЕНИЯ С ДАННЫМИ ИЗМЕРЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫМИ КАК НАЗЕМНЫМИ МЕТОДАМИ, ТАК И С КОСМИЧЕСКИХ ШАТТЛОВ

© 2025 г. О. В. Антоненко*, А. С. Кириллов

Полярный геофизический институт (ПГИ), Анадырь (Мурманская обл.), Россия

*e-mail: antonenko@pgia.ru

Поступила в редакцию 07.04.2024 г.

После доработки 02.09.2024 г.

Принята к публикации 16.10.2024 г.

Рассчитаны значения интегральной светимости полос Герцберга I, Чемберлена и Атмосферных полос на средних широтах и в экваториальной зоне Земли. Обсуждается корреляция результатов теоретических расчетов интенсивности свечения возбужденного молекулярного кислорода на Земле с экспериментальными данными по ночному свечению O_2 , полученными с космических шаттлов, с наземной обсерватории Китт-Пик (США) для полос Герцберга I, Чемберлена. Для Атмосферных полос анализируется корреляция результатов теоретических расчетов с аналогичными расчетами по данным измерений с наземной обсерватории Кека (США). Рассчитаны значения интегральной светимости полос и Атмосферных полос для северных широт Марса.

DOI: 10.31857/S0023420625010013, EDN: HEXAMV

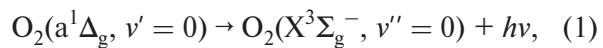
1. ВВЕДЕНИЕ

Осознание возможности существования излучения верхней атмосферы на средних и низких широтах в спокойных геомагнитных условиях не возникало до тех пор, пока не появилось стремление оценить освещенность земной поверхности в ночное время [1]. Первые такие работы показали, что излучение космического пространства (звезды, туманности, галактики, зодиакальный свет) в видимой области спектра составляет только часть общей интенсивности свечения ночного неба [2, 3]. Современные данные [4, 5] показывают, что для видимой области спектра величина суммарного звездного излучения составляет ~ 10 килорэлеев и ~ 7 килорэлеев для собственного излучения верхней атмосферы при спокойных геомагнитных условиях на средних широтах Земли.

Экспериментальные исследования дневного свечения атмосферы Марса начались в ходе пролетов космических летательных аппаратов (КЛА) *Mariner-6* и *Mariner-7* [6]. Измерения ультрафиолетового спектра свечения показали наличие полос электронно-возбужденной молекулы

угарного газа CO и иона молекулы углекислого газа CO_2^+ [6]. В дальнейшем с помощью измерений на КЛА *Mars Express* были открыты ультрафиолетовые авроральные свечения в атмосфере Марса [7], которые аналогично были связаны с полосами CO и CO_2^+ .

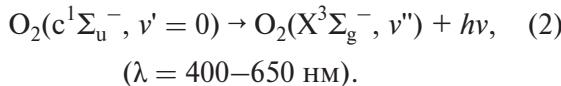
Регистрация свечения ночного неба атмосферы Марса на КЛА *Mars Express* в основном проходила в инфракрасном диапазоне [8–10]. Измерения проводились для Инфракрасной атмосферной полосы 1.27 мкм, излучаемой при спонтанном переходе



($\lambda = 1.27$ мкм).

Недавно были опубликованы результаты измерений ночного свечения атмосферы Марса, полученные на КЛА *Trace Gas Orbiter* в видимом диапазоне [11]. Как было показано авторами, регистрируемый спектр совпадает с измерениями, выполненными на КЛА “Венера-9” и “Венера-10” [12] и *Venus Express* [13] в ночной атмосфере Венеры. Свечение в видимом диапазоне связано с полосами Герцберга II

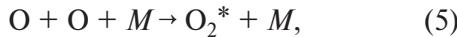
молекулярного кислорода, излучаемых при спонтанных переходах



Процессы диссоциации молекулярных газов солнечным ультрафиолетовым излучением в атмосферах планет земной группы протекают очень эффективно, что приводит к образованию довольно высоких концентраций атомарного кислорода О в верхних слоях атмосфер планет



В атмосфере Земли образование атомарного кислорода за счет процесса (3) происходит на высотах выше 80 км, в атмосфере Марса за счет процесса (4) на высотах выше 40 км. В дальнейшем образованные атомы кислорода участвуют в тройных столкновениях



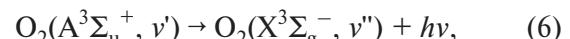
где $M = \text{N}_2$, O_2 в атмосфере Земли и $M = \text{CO}_2$ в атмосфере Марса. В результате таких столкновений (5) образуются электронно-возбужденные молекулы кислорода O_2^* , способные излучать молекулярные полосы в различных спектральных диапазонах при спонтанных излучательных переходах на более низкие по энергии состояния. В табл. 1 приведены энергии двенадцати колебательных уровней $v = 0\text{--}11$ пяти электронно-возбужденных состояний молекулы кислорода. Из табл. 1 видно, что энергии колебательных уровней состояний $\text{A}^3\Sigma_{\text{u}}^+$ и $\text{A}'^3\Delta_{\text{u}}$ имеют значения, близкие к энергии диссоциации молекулы O_2 ($\sim 41300 \text{ см}^{-1}$), а уровни состояний $\text{b}^1\Sigma_{\text{g}}^+$, $\text{a}^1\Delta_{\text{g}}$ имеют намного меньшие значения энергии. Электронно-возбужденные молекулы кислорода излучают фотоны, являясь источником свечения в различных диапазонах спектра в атмосферах планет.

Первые шесть электронных состояний O_2^* (пять из которых приведены в табл. 1,

Таблица 1. Энергии колебательных уровней пяти электронно-возбужденных состояний молекулы O_2

Состояние	Энергия E (см^{-1})
$\text{A}^3\Sigma_{\text{u}}^+ (v = 0 \div v = 11)$	$35010 \div 40926$
$\text{A}'^3\Delta_{\text{u}} (v = 0 \div v = 11)$	$34387 \div 40873$
$\text{c}^1\Sigma_{\text{u}}^- (v = 0 \div v = 11)$	$32665 \div 39360$
$\text{b}^1\Sigma_{\text{g}}^+ (v = 0 \div v = 11)$	$13122 \div 27004$
$\text{a}^1\Delta_{\text{g}} (v = 0 \div v = 11)$	$7889 \div 22761$

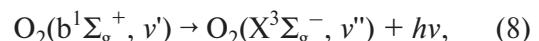
а шестое – квинтетное ${}^5\Pi_{\text{g}}$) являются метастабильными, переходы между ними обуславливают известные девять систем полос, шесть из которых находятся в ультрафиолетовой области спектра, а три – в инфракрасной [1]. В настоящей работе представлены расчеты интенсивностей полос, излучаемых в ночном небе атмосфер Земли и Марса при спонтанных переходах с электронно-возбужденных состояний $\text{A}^3\Sigma_{\text{u}}^+$, $\text{A}'^3\Delta_{\text{u}}$, $\text{b}^1\Sigma_{\text{g}}^+$, то есть полосы Герцберга I (6), полосы Чемберлена (7) и Атмосферные полосы (8), соответственно



$$(\lambda = 300\text{--}370 \text{ нм}) A(A \rightarrow X) = 11 \text{ с}^{-1},$$



$$(\lambda = 360\text{--}440 \text{ нм}) A(A' \rightarrow a) = 0.89 \text{ с}^{-1},$$



$$(\lambda = 620\text{--}900 \text{ нм}) A(b \rightarrow X) = 0.087 \text{ с}^{-1},$$

причем первые две системы полос (6) и (7) располагаются в ультрафиолетовой области, а третья (8) – в инфракрасной. В уравнениях (6)–(8) $A(A \rightarrow X)$, $A(A' \rightarrow a)$, $A(b \rightarrow X)$ – характеристические вероятности переходов (коэффициенты Эйнштейна) соответственно для процессов (6), (7), (8).

Цель настоящей работы – сопоставление теоретических расчетов интенсивности свечения полос, выполненных как для атмосферы Земли, так и для атмосферы Марса, с экспериментальными данными по интенсивностям ночного свечения молекулярного кислорода O_2^* , полученными с космических шаттлов и с наземных станций.

В работе рассматриваются как наземные измерения в Национальной обсерватории Китт-Пик (США, Аризона, 31° с.ш., 72% ясных ночей), обсерватории Кека (пик Мауна-Кеа, остров Гавайи, США, 19° с.ш.), так и измерения с шаттла “Дискавери” на протяжении его семидневной миссии STS53 в декабре 1992 г. и шаттла Индевор на протяжении его двенадцатидневной миссии STS69 в сентябре 1995 г. [14] в ходе эксперимента Arizona Airglow (GLO). GLO – гиперспектральный тепловизор, состоящий из пяти спектрографов для записи всего спектрального диапазона. В ходе Аризонского эксперимента GLO отслеживался слой ночного свечения на линии горизонта Земли [14].

2. ПРОФИЛИ КОНЦЕНТРАЦИЙ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ И МАРСА

Для атмосферы Земли экспериментальные данные о характерных концентрациях О на средних

широтах (55.7° с.ш.; 36.8° в.д.), основанные на измерениях звенигородской обсерватории Института физики атмосферы (ИФА) им. А. М. Обухова РАН), представлены на рис. 1а для различных месяцев года (1 – января, 4 – апреля, 7 – июля, 10 – октября) в условиях низкой ($F_{10.7} = 75$, 1976

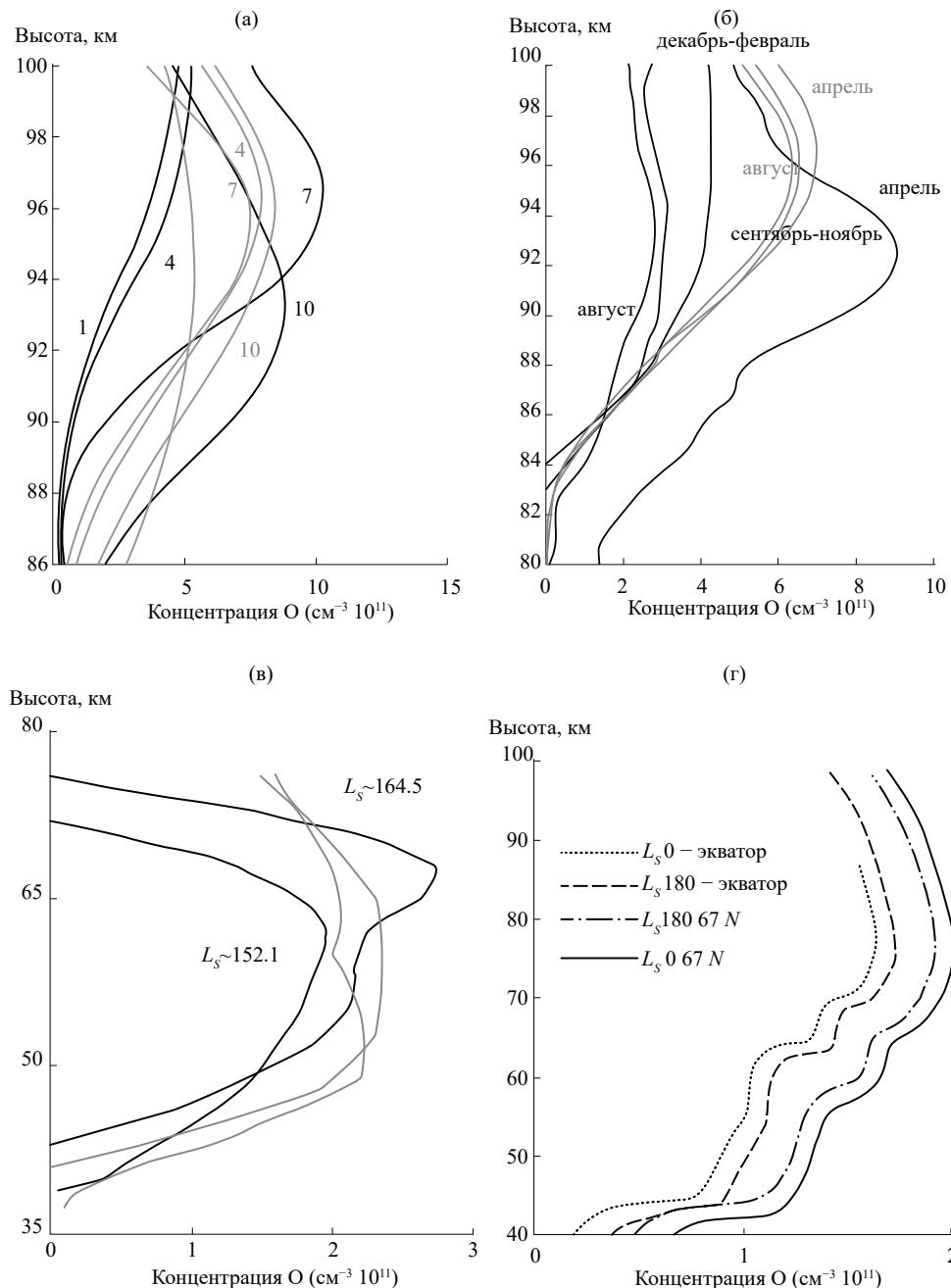


Рис. 1. Высотные профили концентраций О: Панель (а) – темные линии согласно измерениям [1] на средних широтах Земли для 1, 4, 7 и 10-го месяца; светлые линии – данные с NRLMSISE-00 для тех же условий; (б) – темные линии – данные, полученные со спутника *TIMED* в области экватора Земли (апрель, август) и на северных тропиках (осень, зима) [15]; светлые линии – данные с NRLMSISE-00; (в) – темные линии данные для атмосферы Марса, полученные с ИК-спектрометра *SPICAM* для орбит в точках $L_s \approx 152.1^\circ$, $L_s \approx 164.5^\circ$, 82° ю.ш. Марса [9]; светлые линии – данные с LMD-MGCM; (г) – данные LMD-MGCM, для области экватора и 67° с.ш. Марса, для точек $L_s \approx 180^\circ$ и $L_s \approx 0^\circ$ [16]

и 1986 гг.) солнечной активности [1]. Для сравнения на рис. 1а также приведены концентрации О, полученные согласно атмосферной модели NRLMSISE-00 для описанных выше условий.

Экспериментальные данные о характерных концентрациях О в области экватора и на северных тропиках (23.5° с.ш.) Земли (зимний, весенний, летний и осенний сезоны 1995 г.) представлены на рис. 1б. Данные были получены с помощью зондирования атмосферы на спутнике *TIMED* (*Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics*) [15]. На спутнике использовался инструмент системы OSIRIS [15]. Также на рис. 1б для сравнения приводятся данные, полученные согласно атмосферной модели NRLMSISE-00 для тех же условий.

Как видно из рис. 1а и 1б, данные согласно модели *NRLMSISE-00* расходятся с экспериментальными значениями, и в расчетах они не используются. Для профилей температур использовались данные многолетних (1960–2000 гг.) измерений на высотах 30–110 км [1]. Для профилей концентраций N₂, O₂ использовались данные из модели MSIS-90.

На рис. 1в показаны высотные профили О для атмосферы Марса, полученные с ИК-спектрометра SPICAM для орбит $L_s = 152.1^\circ$, $L_s = 164.5^\circ$ (месяц февраль, 82° ю.ш.) [9] и созданные с помощью модели LMD-MGCM для тех же условий (светлые линии) [16]. Для атмосферы Марса в расчетах воспользуемся профилями концентраций атомарного кислорода, полученными из модели общей циркуляции французской лаборатории LMD-MGCM, представленными на рис. 1г для широт экватора и для 67° с.ш. Марса,

причем для условий весеннего ($L_s \approx 0^\circ$) и осеннего ($L_s \approx 180^\circ$) равноденствий. Для профилей концентраций CO₂ и температур использовались данные согласно модели LMD-MGCM [16].

3. РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИЙ O₂^{*} В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ И МАРСА

Как упоминалось ранее [17], при расчете концентраций электронно-возбужденного кислорода O₂^{*} в атмосферах планет Земли и Марса используем следующую формулу:

$$[O_2^*] = q_{v'} \alpha k_1 [O]^2 ([M_1] + \dots + [M_n]) / (A_{v'} + k_2^{M1} [M_1] + \dots + k_2^{Mn} [M_n]), \quad (9)$$

где $q_{v'}$ – квантовый выход колебательного уровня v' электронно-возбужденного состояния и α – квантовый выход этого состояния молекулы O₂^{*} при тройных столкновениях (5); $[M_1] \dots [M_n]$ – концентрации преобладающих атмосферных газов; k_1 – константа скорости реакции рекомбинации при тройных столкновениях (5), которая рассчитывается в зависимости от температуры атмосферы планеты на рассматриваемых интервалах высот; $k_2^{M1} \dots k_2^{Mn}$ – константы скоростей гашения электронно-возбужденного состояния атмосферными составляющими $M_1 \dots M_n$ при бинарных столкновениях; $A_{v'}$ – сумма коэффициентов Эйнштейна для всех спонтанных излучательных переходов с колебательного уровня v' состояния O₂^{*} на все колебательные уровни нижележащих состояний молекулы. В табл. 2 приводятся значения коэффициентов формулы в зависимости от состояния O₂^{*} и от земных или марсианских условий.

Таблица 2. Коэффициенты для расчета концентраций электронно-возбужденного кислорода O₂^{*}

Коэффициенты		Земля	Марс
M_i		O ₂ , N ₂	CO ₂
$k_1(\text{см}^6 \text{с}^{-1})$		$k_1 = 6 \cdot 10^{-34} (300/T)^{2.3}$	$k_1 = 2 \cdot 2.7^{-34} (300/T)^2$
$O_2^* A^3$	$k_2(\text{см}^3 \text{с}^{-1})$	$k_2^{O_2}, k_2^{N_2}$	$k_2^{CO_2}$
	$q_{v'}$	0.001 ÷ 0.09	—
	α	0.05	—
$O_2^* A'^3$	$A_{v'}^{A^3}(\text{с}^{-1})$	11	—
	$q_{v'}$	0.001 ÷ 0.09	—
	α	0.12	—
$O_2^* b^1$	$A_{v'}^{A'^3}(\text{с}^{-1})$	1.1 ÷ 1.9	—
	$q_{v'}$	0.001 ÷ 0.09	0.001 ÷ 0.09
	α	0.2	0.2
$A_{v'}^{b^1}(\text{с}^{-1})$		0.087	0.087

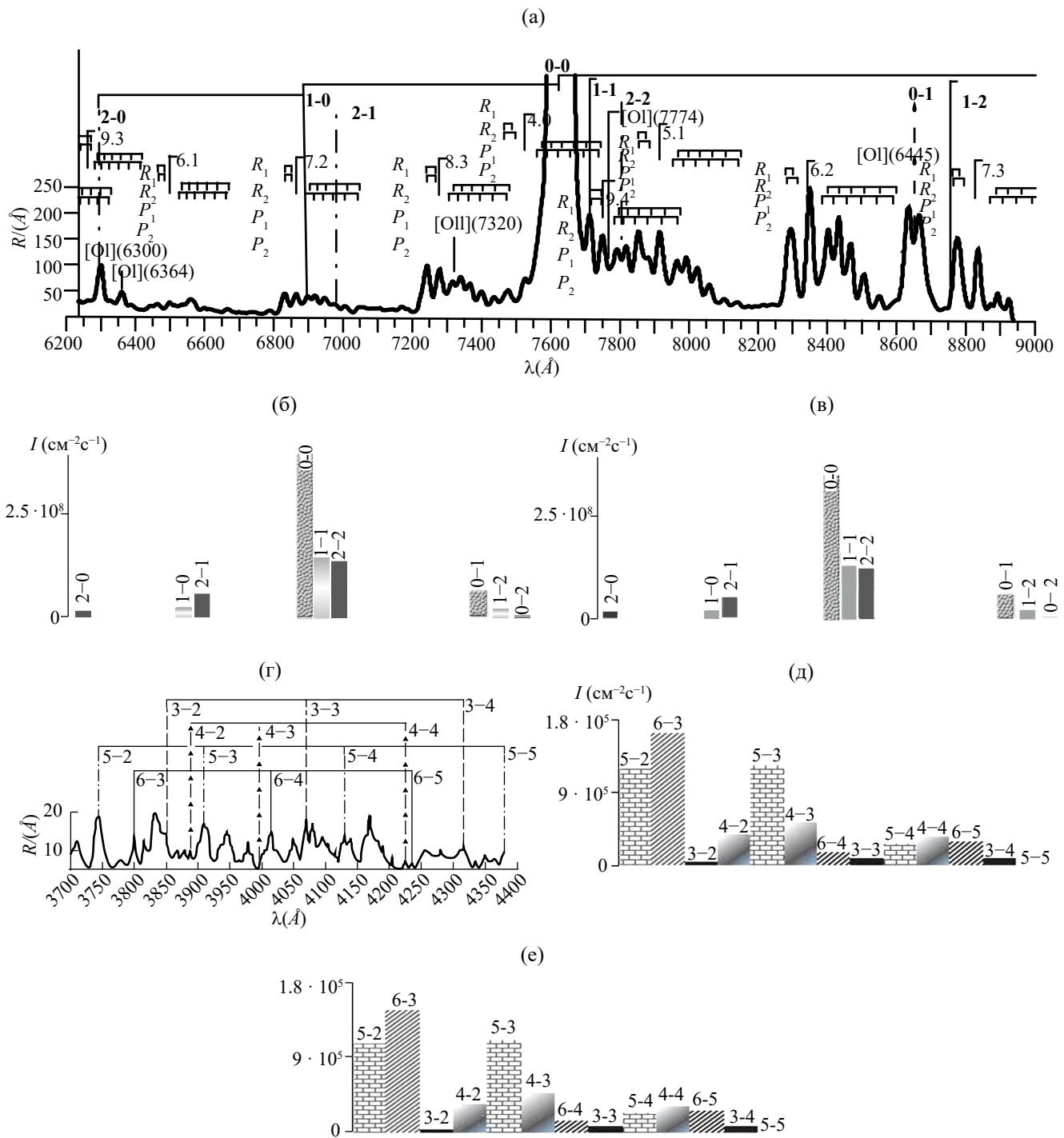


Рис. 2. Панель (а) – экспериментальные данные, полученные с космического шаттла “Инdevор” [14] в диапазоне 620–900 нм (Атмосферные полосы); (б) – рассчитанные значения интегральной светимости Атмосферных полос для атмосферы Земли для средних широт (55.7° с.ш.) для 10-го месяца 1986 г.; (в) – рассчитанные значения для экваториальной зоны и северных тропиков Земли (23° с.ш.) для осеннеого периода 1995 г.; (г) – экспериментальные данные с шаттла “Дискавери”, декабрь 1992 г. в диапазоне 300–870 нм (полосы Чемберлена); (д) – рассчитанные значения интегральной светимости полос Чемберлена для атмосферы Земли для средних широт (55.7° с.ш.) для 10-го месяца 1986 г.; (е) – рассчитанные значения для экваториальной зоны и северных тропиков Земли (23° с.ш.) для осеннеого периода 1995 г.

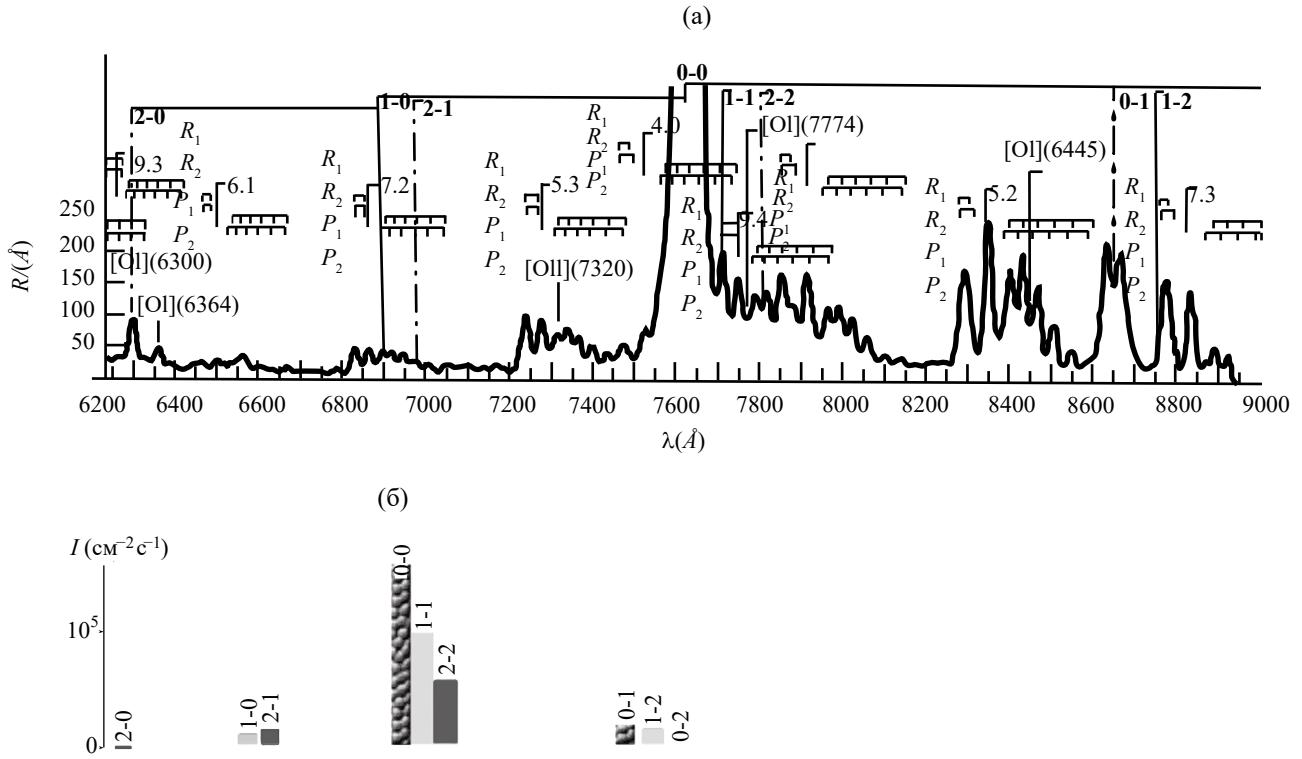


Рис. 3. Панель (а) – экспериментальные данные, полученные с космического шаттла “Инdevор” [14] в диапазоне 620–900 нм (Атмосферные полосы); (б) – рассчитанные значения интегральной светимости Атмосферных полос для атмосферы Марса на широте 67° с.ш. при $L_s \approx 180^\circ$

Коэффициент $k_1(\text{см}^6 \text{с}^{-1})$ для атмосферы Земли берется согласно работе [1], для атмосферы Марса согласно работе [16]. Константы скоростей реакций электронно-возбужденного кислорода $k_2^{\text{O}_2}(\text{см}^3 \text{с}^{-1})$, $k_2^{\text{N}_2}(\text{см}^3 \text{с}^{-1})$ для атмосферы Земли и, соответственно, $k_2^{\text{CO}_2}(\text{см}^3 \text{с}^{-1})$ для атмосферы Марса, учитывались согласно исследованиям [18, 19]. Квантовые выходы для состояний $A^3\Sigma_u^+$ ($q_v^{A^3}$) и $A'^3\Delta_u$ ($q_v^{A'^3}$) учитывались согласно работам [20, 21], квантовые выходы для состояния $b^1\Sigma_g^+$ (q_v^b) согласно работе [22]. Квантовый выход α^{A^3} и $\alpha^{A'^3}$ – согласно работе [23], α^b согласно [22]. Сумма коэффициентов Эйнштейна $A_v^{A^3}(\text{с}^{-1})$ для всех спонтанных излучательных переходов с колебательного уровня v' состояния $A^3\Sigma_u^+$ на все колебательные уровни состояния $X^3\Sigma_g^-$ учитывалась согласно работе [24]. Аналогично сумма коэффициентов $A_v^{A'^3}(\text{с}^{-1})$ для всех спонтанных излучательных переходов с колебательного уровня v' состояния $A'^3\Delta_u$ на все колебательные уровни состояний $a^1\Delta_g$ и $X^3\Sigma_g^-$ учитывалась также согласно работе [24]. Для переходов с колебательного уровня v' состояния $b^1\Sigma_g^+$ на все колебательные уровни состояния $X^3\Sigma_g^-$ значения $A_v^b(\text{с}^{-1})$ учитывались согласно работе [1].

4. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ КАК НАЗЕМНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ, ТАК И С КОСМИЧЕСКИХ ШАТЛЛОВ, С ТЕОРЕТИЧЕСКИМИ РАСЧЕТАМИ

В настоящей работе на рис. 2а и 3а представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночного неба в диапазоне 620–900 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла *Инdevор* на протяжении его 12-дневной миссии STS69 в сентябре 1995 г. [14]. Значения интенсивности излучения $I_{v'v''}(\text{см}^{-2} \text{с}^{-1})$ (гистограммы) для Атмосферных полос, обусловленных переходом (8), были рассчитаны и представлены для этого диапазона длин волн для средних широт Земли на рис. 2б. Каждая двойка цифр над пиками свечения обозначает колебательные уровни ($v'-v''$) при излучательном переходе (8). Также значения интенсивности излучения были рассчитаны для области экватора северных тропиков Земли (23.5° с.ш.) для осеннего сезона 1995 г. (рис. 2в). Для атмосферы Марса гистограммы для Атмосферных полос были рассчитаны для

широты 67° с.ш. при $L_s \approx 180^\circ$ т.е. для осеннего равноденствия (рис. 3б).

Как видно из сравнения рис. 2б и 3б, для атмосферы Марса происходит изменение

относительных населенностей колебательных уровней состояния $b^1\Sigma_g^+$ и их вклада в свечение Атмосферных полос по сравнению с атмосферой Земли. Так населенность колебательного уровня

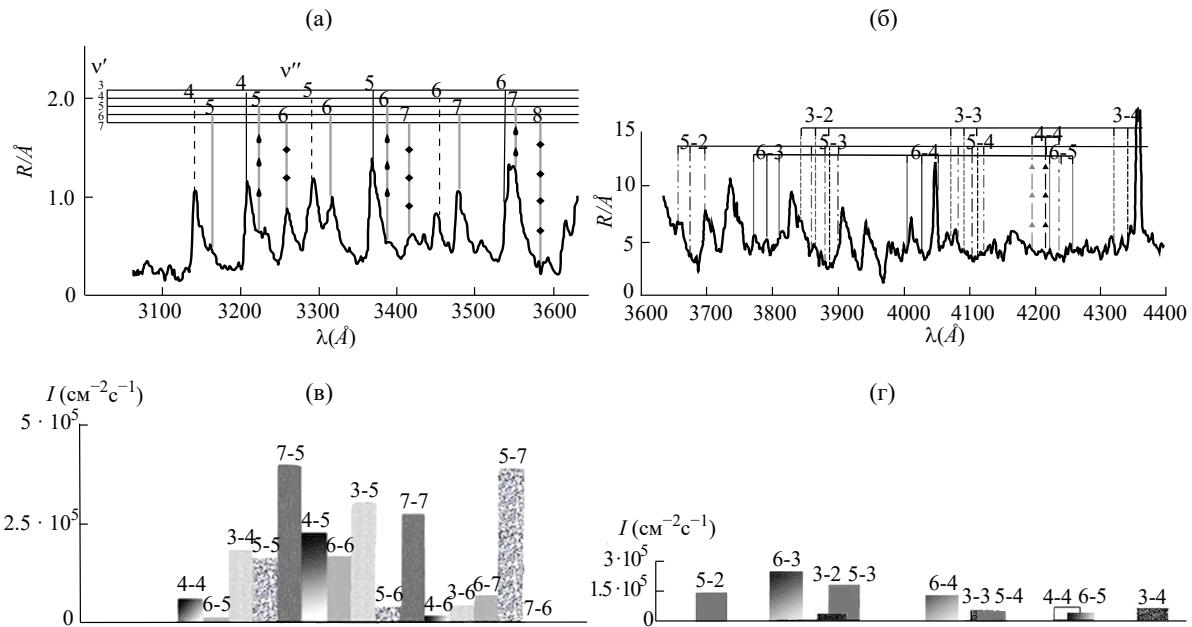


Рис. 4. Панель (а) – экспериментальные данные, полученные со спектрографа EbertFastie в диапазоне 300–370 нм (обсерватория Китт-Пик); (б) – экспериментальные данные, полученные со спектрографа EbertFastie в диапазоне 360–440 нм; (в) – рассчитанные значения интегральной светимости полос Герцберга I для средних широт Земли; (г) – рассчитанные значения интегральной светимости полос Чемберлена для средних широт Земли

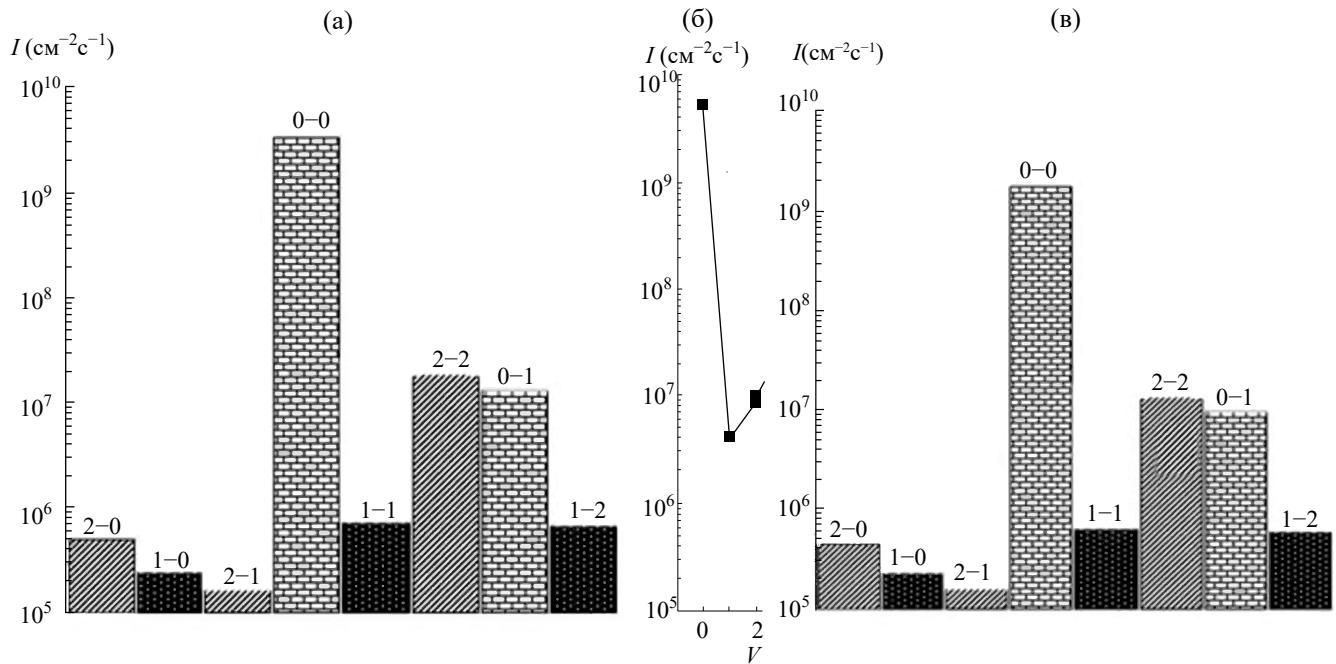


Рис. 5. Панель (а) – рассчитанные значения интенсивности Атмосферных полос для средних широт Земли (55.7° с.ш.) для 1-го месяца 1986 г.; (б) – данные измерений, выполненных спектрографом высокого разрешения (HIRES) на телескопе Keck I [28]; (в) – результаты расчетов для экваториальной зоны включая северные тропики (23° с.ш.), для зимнего периода 1995 г.

$v' = 1$ и $v' = 2$ относительно уровня $v' = 0$ значительно увеличивается по сравнению с атмосферой Земли. Объясняется это различным характером гашения этого состояния на молекулах N_2 , O_2 и CO_2 [19]. Основное гашение молекулы $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' = 0)$ в атмосфере Земли происходит на молекулах N_2 , причем константа более чем на два порядка меньше, чем аналогичная константа для столкновений с CO_2 [19]. Для молекул $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' = 2)$ в атмосфере Земли гашение происходит на молекулах O_2 , а константы для этого процесса превосходят аналогичные константы для столкновений с CO_2 . При этом константа для столкновения $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' = 1) + O_2$ на порядок больше, чем для $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' = 2) + O_2$. Для столкновений $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' = 2)$ с молекулой углекислого газа константы близки по значению [19]. Поэтому наблюдается рост населения колебательного уровня $v' = 1$ относительно уровня $v' = 2$ для атмосферы Марса.

Также на рис. 2г представлен фрагмент усредненного спектра свечения ночных небес в диапазоне 360–440 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла “Дискавери” (STS-53) на протяжении его семидневной миссии в декабре 1992 г. [14]. Рассчитанные значения интегральной светимости полос Чемберлена в этом же диапазоне частот показаны на рис. 2д для средних широт Земли (55.7° с.ш.) для 1 месяца 1986 г. На рис. 2е аналогичные результаты показаны для экваториальной зоны и северных тропиков Земли (23° с.ш.) для зимнего периода 1995 г. При расчетах использовались модельные значения профилей концентраций атомарного кислорода [1, 25], полученные для среднеширотных полуночных условий на основе высотных профилей излучения $O(^1S)$ 557.7 нм, приведенных к средней солнечной активности ($F_{10.7} = 130$) и невозмущенной геомагнитной активности ($K_p = 0$). Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показывает, что и в эксперименте, и при расчетах наблюдается доминирование вклада в свечение полос Чемберлена, обусловленных спонтанными излучательными переходами (7) с колебательных уровней $v' = 3, 5, 6$. Однако остается неясным расхождение для полосы (3–4), для которой значения светимости в расчетах получаются завышенными по сравнению с экспериментальными данными.

Кроме того, наряду с экспериментальными данными, полученными с космических шаттлов, здесь представлены результаты наземных измерений. На рис. 4а приведены значения измерений

интенсивностей свечения полос Герцберга I, полученных со спектрографа EbertFastie в диапазоне 300–370 нм (Национальная обсерватория Китт-Пик, США, Аризона 32° с.ш.) на высоте 2080 м [26]. В УФ-длинах волн (310–450 нм) использовался ультрафиолетовый источник низкой яркости [27]. Обсерватория функционирует с 1958 г., однако авторы работы [26] описывают наблюдения, ссылаясь на измерения 1961–1964 гг. в период низкой солнечной активности. На рис. 4в приведены рассчитанные значения интегральной светимости полос Герцберга I в этом же диапазоне частот для средних широт Земли (55.7° с.ш.) для 1 месяца 1986 г. Аналогично данные измерений, полученные со спектрографа EbertFastie в диапазоне 360–440 нм, и рассчитанные значения интегральной светимости полос Чемберлена в том же диапазоне для средних широт Земли представлены на рис. 4в и 4г соответственно.

На рис. 5 представлены экспериментальные и рассчитанные значения интегральной светимости Атмосферных полос с первых трех колебательных уровней $v' = 0–2$ состояния $b^1\Sigma_g^+$. На рис. 5а приведены рассчитанные значения для средних широт Земли (55.7° с.ш.) для 1 месяца 1986 г.; на рис. 5б – аналогичные данные измерений, выполненных спектрографом высокого разрешения (HIRES) на крупнейшем оптическом телескопе Keck I (обсерватория Кека, пик Мауна-Кеа, 4145 м, Гавайи, США, 19° с.ш.) [28]; на рис. 5в отражены результаты расчетов для экваториальной зоны, включая северные тропики (23° с.ш.), для зимнего периода 1995 г. Авторы работы [28] отмечают, что с того времени, как вышеназванный телескоп впервые увидел свет, началась новая эра в исследованиях системы Атмосферных полос молекулярного кислорода O_2 . 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. [29], 1996 г. [30].

Как видно из сравнения результатов расчетов и экспериментальных данных, населенность колебательного уровня $v' = 0$ значительно превосходит населенности уровней $v' = 1$ и 2 , что связано с особенностями гашения этих уровней на молекулах N_2 и O_2 [19]. В свою очередь населенность $v' = 2$ превосходит населенность $v' = 1$ из-за меньшей константы гашения на молекулах O_2 [19].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основании экспериментальных данных по профилям концентрации атомарного кислорода и температуры в атмосфере Земли на средних широтах (55.7° с.ш.) и в экваториальной зоне и в северных тропиках (23° с.ш.) для зимнего, весеннего, летнего и осеннего периодов проведены расчеты объемных и интегральных интенсивностей полос Герцберга I в диапазоне длин волн $300\text{--}370$ нм, полос Чемберлена в диапазоне $360\text{--}440$ нм, Атмосферных полос в диапазоне $620\text{--}900$ нм. Проведено сравнение рассчитанных значений со спектральными измерениями на космических шаттлах “Дискавери” (STS-53) и “Индевор” (STS-69) [14]. Также проведено сравнение рассчитанных значений с экспериментальными данными, полученными со спектрографа EbertFastie (Национальная обсерватория Китт-Пик, США, Аризона 32° с.ш.) [26], и с данными, полученными с помощью телескопа Keck I (обсерватория Кека, пик Мауна-Кеа, 4145 м, Гавайи, 19° с.ш.) [28].

Показано, что наблюдается хорошая корреляция результатов расчета с данными измерений с космических шаттлов и с результатами наземных измерений. Так излучательные переходы (7) с колебательных уровней $v' = 3, 5, 6$ состояния $A^3\Delta_u$ дают доминирующий вклад в свечение в диапазоне $300\text{--}870$ нм, что согласуется с экспериментальными данными. Излучательные переходы (8) с колебательных уровней $v' = 0\text{--}2$ состояния $b^1\Sigma_g^+$ дают доминирующий вклад в свечение в диапазоне $620\text{--}900$ нм. 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 [28].

Расчеты интенсивностей свечения Атмосферных полос в диапазоне длин волн $620\text{--}900$ нм проведены для условий Марса для широты 67° при $L_s \approx 180^\circ$, т.е. осеннего равноденствия. Получено, что для условий Марса происходит изменение относительного вклада колебательных уровней состояния $b^1\Sigma_g^+$ в свечение Атмосферных полос. Так относительный вклад колебательного уровня $v' = 1$ значительно увеличивается по сравнению с условиями в атмосфере Земли. Объясняется это особенностями гашения молекул $O_2(b^1\Sigma_g^+, v' = 0\text{--}2)$ при столкновении

с основными составляющими N_2 и O_2 в атмосфере Земли и с CO_2 в атмосфере Марса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
- Newcomb S. Is the Airship Coming? // McClure's magazine. 1901. V. 17(5). P. 432–435.
- Хвостиков И.А. Свечение ночного неба. М., Л.: Издательство академии наук СССР, 1937. 165 с.
- Шаров А.С., Липаева Н.А. Звездная составляющая свечения ночного неба // Астрон. журн. 1973. Т. 50. № 1. С. 107–114.
- Роч Ф., Гордон Дж. Свечение ночного неба. М.: Мир, 1977. 152 с.
- Barth C.A., Hord C.W., Pearce J.B. et al. Mariner 6 and 7 ultraviolet spectrometer experiment: Upper atmosphere data // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. Iss. 10. P. 2213–2227.
- Bertaux J.L., Leblanc F., Witasse O. et al. Discovery of an aurora on Mars // Nature. 2005. V. 435. P. 790–794.
- Migliorini A., Altieri F., Zasova G. et al. Oxygen airglow emission on Venus and Mars as seen by VIRTIX/VEX and OMEGA/MEX imaging spectrometers // Planet. Space Sci. 2011. V. 59. Iss. 10. P. 981–987.
- Fedorova A.A., Lefevre F., Guslyakova S. et al. The O_2 nightglow in the Martian atmosphere by SPICAM onboard of Mars-Express // Icarus. 2012. V. 219. Iss. 2. P. 596–608.
- Bertaux J.L., Gondet B., Lefevre F. et al. First detection of O_2 $1.27\text{ }\mu\text{m}$ nightglow emission at Mars with OMEGA/MEX and comparison with general circulation model predictions // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. Art.ID. E00J04.
- Gérard J.C., Soret L., Thomas I.R. et al. Observation of the Mars O_2 visible nightglow by the NOMAD spectrometer onboard the Trace Gas Orbiter // Nature Astronomy. 2024. V. 8. P. 77–81.
- Краснопольский В.А., Крысько А.А., Рогачев В.Н. и др. Спектроскопия свечения ночного неба Венеры на АМС “Венера-9” и “Венера-10” // Косм. исслед. 1976. Т. 14. № 5. С. 789–795.
- Migliorini A., Piccioni G., Gerard J.C. et al. The characteristics of the O_2 Herzberg II and Chamberlain bands observed with VIRTIS/Venus Express // Icarus. 1976. V. 223. Iss. 1. P. 609–614.
- 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. Iss. A8. P. 17127–17138.

15. Sheese P.E., McDade I.C., Gattinger R.L. et al. Atomic oxygen densities retrieved from Optical Spectrograph and Infrared Imaging System observations of O₂ A-band airglow emission in the mesosphere and lower thermosphere // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art.ID. D01303.
16. Gagne M.E., Melo S.M.L., Lefevre F. et al. Modeled O₂ airglow distributions in the Martian atmosphere // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. Art.ID. E06005.
17. Антоненко О.В., Кириллов А.С. Исследование влияния сезонных и широтных вариаций атомарного кислорода на интенсивность собственного излучения ночных атмосфер Земли и Марса // Косм. исслед. 2024. Т. 62. № 1. С. 51–59.
18. Kirillov A.S. Electronic kinetics of main atmospheric components in high-latitude lower thermosphere and mesosphere // Ann. Geophys. 2010. V. 28. Iss. 1. P. 181–192.
19. 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.
20. 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. 2021. Т. 85. № 3. С. 310–314.
21. Антоненко О.В., Кириллов А.С. Моделирование интенсивности свечения полос Чемберлена и Герцберга I в ночном небе Земли и сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 5. С. 661–670.
22. Yankovsky V. On how atmospheric temperature affects the intensity of oxygen emissions in the framework of the Barth's mechanism // Advances in Space Research. 2021. V. 67. P. 921–929.
23. Krasnopol'sky V.A. Excitation of the oxygen nightglow on the terrestrial planets // Planet. Space Sci. 2011. V. 59. Iss. 8. P. 754–756.
24. Bates D.R. Oxygen band system transition arrays // Planet. Space Sci. 1989. V. 37. Iss. 7. P. 881–887.
25. Перминов В.И., Семенов 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.
26. Broadfoot A.L., Kendall K.R. The Airglow Spectrum, 3100–10,000 Å // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. Iss. 1. P. 426–428.
27. Broadfoot A.L., Hunten D.M. Excitation of N₂ band systems in aurora // Canadian. J. Phys. 1964. V. 42. Iss. 6. P. 1212–1230.
28. Slanger T.G., Cosby P.P.C., Huestis D.L. et al. Vibrational level distribution of O₂ in the mesosphere and lower thermosphere region // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. Iss. D16. P. 20557–20564.
29. Vogt S. The High Resolution Echelle Spectrometer on the Keck ten-meter telescope // Opt. Eng. 1994. V. 2198. P. 362–375.
30. Osterbrock D.E., Fulbright J.P., Martel A.R. et al. Night-sky high-resolution spectral atlas of OH and O₂ emission lines for echelle spectrograph wavelength calibration // Publ. Astron. Soc. Pacific. 1996. V. 108. P. 277–308.

COMPARISON OF THE RESULTS OF THEORETICAL CALCULATIONS OF NIGHT GLOW INTENSITY WITH MEASUREMENT DATA OBTAINED BY BOTH GROUND-BASED METHODS AND FROM SPACE SHUTTLES

© 2025 O. V. Antonenko*, A. S. Kirillov

Polar Geophysical Institute (PGI), Apatity, Russia

*e-mail: antonenko@pgia.ru

The integral luminosity values of the Herzberg I, Chamberlain and Atmospheric bands at mid-latitudes and in the equatorial zone of the Earth are calculated. The correlation of the results of theoretical calculations of the intensity of excited molecular oxygen glow on Earth with experimental data on the night glow of O₂ obtained from space shuttles, from the ground-based Kitt Peak Observatory (USA) for the Herzberg I and Chamberlain bands is discussed. For the Atmospheric bands, the correlation of the results of theoretical calculations with similar calculations based on measurement data from the ground-based Keck Observatory (USA) is analyzed. The integral luminosity values of the Herzberg I and Atmospheric bands for the northern latitudes of Mars are calculated.