

УДК: 550.388

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЗОННЫХ И ШИРОТНЫХ ВАРИАЦИЙ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СОБСТВЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНЫХ АТМОСФЕР ЗЕМЛИ И МАРСА

©2024 г. О.В. Антоненко^{1,*}, А.С. Кириллов¹

¹Полярный геофизический институт (ПГИ), Апатиты, Россия

*antonenko@pgia.ru

Поступила в редакцию 19.04.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 31.08.2023 г.

В работе используются экспериментальные данные о характерных концентрациях атомарного кислорода в верхних атмосферах Земли и Марса. Рассчитаны значения интегральной светимости полос Герцберга I для средних широт и экваториальной зоны Земли, а также для северных широт и экваториальной зоны Марса. Обсуждается корреляция результатов теоретических расчетов интенсивности свечения полос электронно-возбужденного молекулярного кислорода в атмосфере Земли в спектральном диапазоне 250–370 нм с экспериментальными данными по ночному свечению молекулярного кислорода, полученными с космического шаттла «Дискавери» (STS-53). Представлены рассчитанные значения общей интегральной светимости системы полос Герцберга I в атмосфере Земли для различных сезонов и для точек равноденствия Марса. Показано, что на средних широтах Земли в период низкой солнечной активности максимальные значения интегральной светимости отмечаются в июле, а в экваториальной зоне — в апреле. На северных широтах Марса максимальные значения отмечаются в точке осеннего равноденствия.

DOI: 10.31857/S0023420624010043

ВВЕДЕНИЕ

Исследования атмосфер планет земной группы связаны с изучением проблем самого высокого научного приоритета, включая изменение условий обитания на нашей планете и происхождение жизни. Последние годы большое внимание уделяется исследованиям атмосферы Марса. Свидетельства об изменениях климата красной планеты привлекают особое внимание исследователей.

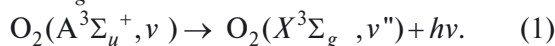
Дистанционные исследования атмосфер, включая спектроскопические исследования, открывают широкие возможности получения информации об излучательном балансе атмосферы, ее составе и тепловом режиме, тем самым позволяя лучше понять историю и эволюцию климата на планетах. Высокое спектральное разрешение измерительной аппаратуры дает возможность даже с Земли наблюдать линии и полосы свечения атмосфер планет на фоне земных. Однако наземным наблюдениям присущи определенные ограничения: измерения в районе сильных

полос поглощения в атмосфере Земли, поэтому спектрометрические измерения с межпланетных космических аппаратов (КА) имеют большое значение для планетных исследований [1].

Для исследований атмосферы Земли приоритетными являются наземные наблюдения, в то время как космические исследования, которые в настоящее время проводятся со спутников, лишь дополняют наземные. Космические наблюдения, которые можно связать с наземными, возможны всего в течение нескольких минут в день. Наземные наблюдения могут быть сопоставимы с космическими, работающими только в режиме моментального снимка, при условии использования высокопроизводительного оборудования в течение ограниченного времени полета.

Известно, что источником ночного свечения атмосферы Земли в ультрафиолетовом диапазоне (250–370 нм) является электронно-возбужденный молекулярный кислород $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ [2, 3], который излучает систему полос Герцберга I при спонтанных переходах

с триплетного состояния $A^3\Sigma_u^+$ на основное состояние $X^3\Sigma_g^-$:



Причиной образования электронно-возбужденных молекул O_2^* являются тройные столкновения



с участием третьей частицы M (молекулы N_2 и O_2 в атмосфере Земли) и атомов кислорода O , образующихся при фотодиссоциации молекул O_2 солнечным УФ-излучением в дневное время. Эти тройные реакции происходят в узком слое атмосферы Земли толщиной около 10 км с центром на высоте около 90 км [2].

В верхней атмосфере Венеры на дневной стороне, примерно на высотах 75–120 км, атомы O образуются в результате фотодиссоциации доминирующего газа CO_2 , причем с максимумом на высотах 93–98 км [4]. На дневной стороне Марса на высотах более 80 км также происходит фотодиссоциация молекул доминирующего газа CO_2 с образованием атомов кислорода [5]. Поэтому аналогичные процессы (2) с участием двух атомов кислорода и молекул углекислого газа $M = CO_2$ протекают в верхних атмосферах Венеры и Марса с образованием электронно-возбужденных молекул кислорода как в состоянии $A^3\Sigma_u^+$, так и других двух состояниях Герцберга: $c^1\Sigma_u^-$ и $A'^3\Delta_u$.

Из этих двух планет спектральные измерения свечения полос с состояний Герцберга были проведены для атмосферы Венеры, которые впервые были выполнены на КА «Венера-9» и «Венера-10» и опубликованы В.А. Краснополяским [6, 7]. Автором этих работ было показано, что свечение молекулярного кислорода происходит в видимом диапазоне 400–600 нм с максимумом в районе 500 нм. Как показал спектральный анализ [7–9], данное свечение связано с излучательными переходами с нулевых колебательных уровней состояний $c^1\Sigma_u^-, v = 0$ и $A'^3\Delta_u, v = 0$ на состояния $X^3\Sigma_g^-$ и $a^1\Delta_g$, приводящие к свечению полос Герцберга II и Чемберлена. Для Марса подобных измерений в ультрафиолетовом и видимом диапазоне спектра свечения ночного неба не проводилось.

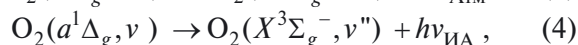
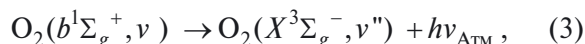
Единственная космическая платформа, которая поддержала экспериментальные измерения ультрафиолетового свечения молекулярного кислорода в атмосфере Земли, это космический шаттл, или космическая транспортная система (STS), работающая в режиме моментального снимка в течение ограниченного времени

полета и способная поддерживать сопоставимые с наземными наблюдения. При этом полет шаттла короткий, обычно всего 7–12 дней, скорость передачи данных высокая, так как используется высокопроизводительное оборудование. Кроме того, наблюдения могут периодически повторяться при прохождении по орбите над многими наземными станциями.

Цель данной работы — провести сравнение результатов теоретических расчетов интенсивности свечения полос Герцберга I в диапазоне длин волн 250–370 нм с экспериментальными данными по ночному свечению молекулярного кислорода O_2^* в атмосфере Земли, полученными со спектрографа GLO на борту космического шаттла «Дискавери» (семидневная миссия STS-53 в декабре 1992 г.). Также в данном спектральном диапазоне проведены теоретические расчеты интенсивностей свечения полос Герцберга I для атмосферы Марса.

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НОЧНОМ НЕБЕ АТМОСФЕР ЗЕМЛИ И МАРСА

В результате тройных столкновений (2) в верхних слоях атмосфер планет земной группы эффективно образуются молекулы кислорода, возбужденные не только в состояния Герцберга $c^1\Sigma_u^-, A'^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+$, но и в синглетные состояния $b^1\Sigma_g^+, a^1\Delta_g$ [2, 3]. В дальнейшем электронно-возбужденная молекула синглетного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+, a^1\Delta_g)$ переходит в более низкое по энергии состояние $X^3\Sigma_g^-$, излучая при этом фотоны Атмосферной (Атм) и Инфракрасной Атмосферной (ИА) систем полос:



которые также регистрируются в инфракрасных спектрах свечения ночного неба как в атмосфере Земли [2, 3], так и Марса [10, 11]. На рис. 1 представлена схема трех систем полос, связанных со спонтанными излучательными переходами между различными электронными состояниями: полосы Герцберга I $O_2(A^3\Sigma_u^+, v') \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v'')$, Атмосферные полосы $O_2(b^1\Sigma_g^+, v') \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v'')$, Инфракрасные атмосферные полосы $O_2(a^1\Delta_g, v') \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v'')$. Все приведенные состояния находятся ниже энергии диссоциации молекулы $O_2 \sim 41\,300\text{ см}^{-1}$ ($8065\text{ см}^{-1} = 1\text{ эВ}$). Длины волн λ всех указанных на рисунке полос можно рассчитать по формулам

$$\lambda_{HI} = 1 / (E_{A(v)} - E_{X(v'')}), \quad (5a)$$

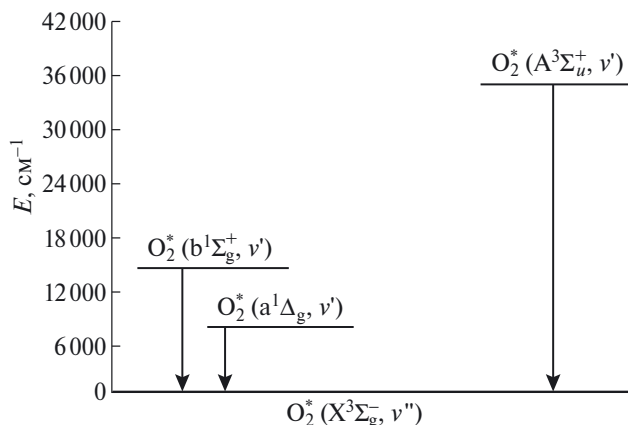


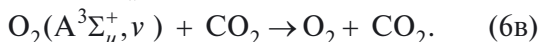
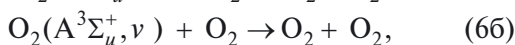
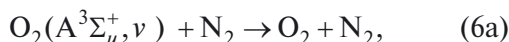
Рис. 1. Схема переходов между различными электронными состояниями молекулы $[O_2]$.

$$\lambda_{\text{АТМ}} = 1 / (E_{b(v')} - E_{X(v'')}), \quad (56)$$

$$\lambda_{\text{ИА}} = 1 / (E_{a(v')} - E_{X(v'')}), \quad (5в)$$

где $E_{A(v')}(\text{см}^{-1})$ — энергия колебательного уровня v' состояния $A^3\Sigma_u^+$; $E_{b(v')}(\text{см}^{-1})$ — энергия колебательного уровня v' состояния $b^1\Sigma_g^+$; $E_{a(v')}(\text{см}^{-1})$ — энергия колебательного уровня v' состояния $a^1\Delta_g$; $E_{X(v'')}(\text{см}^{-1})$ — энергия колебательного уровня v'' состояния $X^3\Sigma_g^-$. Как видно из рис. 1, энергия фотонов ультрафиолетовых полос Герцберга I намного превосходит энергию фотонов Атмосферных и Инфракрасных Атмосферных полос, располагающихся в инфракрасном диапазоне.

Поскольку переходы между указанными выше состояниями дипольно-запрещенные и излучательные времена жизни принимают высокие значения, то при расчетах концентраций электронно-возбужденного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+)$ необходимо учитывать исчезновение данных молекул не только при излучательных переходах, но и гашение данного состояния при неупругих столкновениях с молекулами N_2 , O_2 в атмосфере Земли [12] и с молекулами CO_2 в атмосфере Марса:



Так как концентрации N_2 на высотах 90–100 км превышают 10^{13} см^{-3} , а константы гашения состояния $A^3\Sigma_u^+$ больше $\sim 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ [13, 14], то столкновительные времена жизни рассматриваемых колебательных уровней данного состояния либо сравнимы, либо намного меньше излучательных на высотах ночного свечения полос Герцберга I. Это означает, что кинетика указанного состояния на рассматриваемом диапазоне высот

атмосферы во многом определяется столкновительными процессами.

Поэтому при расчете концентраций электронно-возбужденного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+, v')$ в атмосфере Земли, где на рассматриваемых высотах преобладают молекулы азота N_2 и кислорода O_2 , используем следующую формулу:

$$[O_2(A^3\Sigma_u^+, v)] = q_v^A \alpha_A k_2 [O]^2 ([N_2] + [O_2]) / (A_v^A + k_{6a}[N_2] + k_{6b}[O_2]), \quad (7a)$$

где α_A — квантовый выход состояния $O^3\Sigma_u^+$ при тройных столкновениях (2), q_v^A — квантовый выход колебательного уровня v' этого состояния $A^3\Sigma_u^+$; k_2 — константа скорости реакции рекомбинации при тройных столкновениях (2), k_{6a} , k_{6b} — константы скоростей реакций (6a, 6б); A_v^A — сумма коэффициентов Эйнштейна для всех спонтанных излучательных переходов с колебательного уровня v' состояния $A^3\Sigma_u^+$ на все колебательные уровни состояния $X^3\Sigma_g^-$. Для атмосферы Марса, где преобладает углекислый газ CO_2 , воспользуемся формулой

$$[O_2(A^3\Sigma_u^+, v)] = q_v^A \alpha_A k_2 [O]^2 [CO_2] / (A_v^A + k_{6b}[CO_2]). \quad (7б)$$

Константа скорости реакции рекомбинации $k_2(\text{см}^6 \text{ с}^{-1})$ рассчитывалась в зависимости от температуры атмосферы планеты на рассмотренных интервалах высот согласно [2]; константы гашения электронно-возбужденного кислорода при столкновениях с молекулами атмосферных составляющих $k_{6a}(\text{см}^3 \text{ с}^{-1})$, $k_{6b}(\text{см}^3 \text{ с}^{-1})$ и $k_{6в}(\text{см}^3 \text{ с}^{-1})$ учитывались согласно [13, 14]; квантовый выход α_A — согласно [15], коэффициенты Эйнштейна для всех спонтанных переходов — согласно [16], квантовые выходы q_v^A учитывались согласно [17, 18].

При расчете концентраций $O_2(A^3\Sigma_u^+, v')$ в атмосфере Земли согласно (7a) воспользуемся экспериментальными данными о характерных концентрациях $[O]$ в верхней атмосфере Земли на основании характеристик свечения атомарного кислорода O для различных месяцев года 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, проводимых на протяжении нескольких десятков лет сотрудниками ИФА [2, 19]. Также в расчетах используются экспериментальные данные о характерных

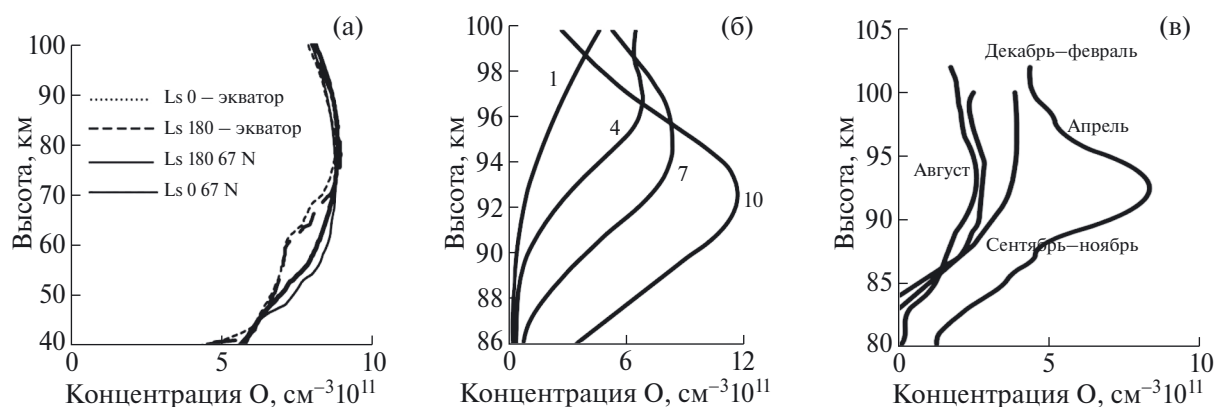


Рис. 2. Высотные профили концентраций атомарного кислорода [O].

концентрациях [O] в области экватора и в северных тропиках (23.5°N) Земли. Эти данные были получены с помощью зондирования атмосферы на спутнике *TIMED* (термосферно-ионосферно-мезосферной энергетики и динамики) с использованием оптического спектрографа инфракрасной микроскопической системы *OSIRIS* [20].

Также для верхней атмосферы Марса высотные распределения концентраций атомарного кислорода [O] используются согласно модели общей циркуляции (*англ.* General Circulation Model – GCM) французской лаборатории динамической метеорологии (*франц.* Laboratoire de Météorologie Dynamique – LMD), обычно называемой LMD-MGCM [21]. На рис. 2 представлены профили концентраций атомарного кислорода [O] для атмосферы Марса согласно [21] (рис. 2а) на северных широтах (67°N) и в экваториальной зоне ($L_s \sim 0^\circ$, $L_s \sim 180^\circ$), для верхней атмосферы Земли на средних широтах (55.7°N) согласно [2, 19] (рис. 2б) (для января, апреля, июля и октября 1980–1981 гг.) и для экваториальной области и северных тропиков (23°N) согласно [20] (рис. 2в) (зимний, весенний, летний и осенний сезоны). Полученные результаты показали значительный разброс значений абсолютных концентраций атомарного кислорода в атмосфере Земли на высотах максимальных значений, причем высота данного максимума также оставалась непостоянной. Этого мы не можем сказать о Марсе, так как разброс значений абсолютных концентраций атомарного кислорода малозаметен по сравнению со значениями для атмосферы Земли.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛОС ГЕРЦБЕРГА I ДЛЯ УСЛОВИЙ ЗЕМЛИ И МАРСА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно формулам (7а) и (7б) проведен расчет профилей высотного распределения концентраций электронно-возбужденного молекулярного кислорода $\text{O}_2^*(A^3\Sigma_u^+)$ в верхних атмосферах Земли и Марса. При расчетах значений концентраций электронно-возбужденного кислорода для атмосферы Земли использовались высотные профили температур, составленные на основе данных многолетних (1960–2000) измерений профилей температуры на высотах 30–110 км [22]. Высотные профили температур, используемые при расчетах значений концентраций электронно-возбужденного кислорода в атмосфере Марса, получены из модели общей циркуляции (LMD-MGCM) [21].

Расчеты концентраций электронно-возбужденного кислорода $\text{O}_2^*(A^3\Sigma_u^+)$ на высотах верхней атмосферы Земли для широты 55.7°N проведены для колебательных уровней $v' = 2 \dots 9$ состояния Герцберга I $A^3\Sigma_u^+$ для различных месяцев года (средних месяцев каждого сезона: января, апреля, июля, октября) 1980 и 1981 гг. [2], а для экваториальной зоны и северных тропиков Земли (23°N) для зимнего, весеннего, летнего и осеннего периодов. Аналогичные расчеты концентраций $\text{O}_2^*(A^3\Sigma_u^+)$ на высотах верхней атмосферы Марса были проведены для экваториальной зоны и для северных широт (67°N) во время весеннего ($L_s \sim 0^\circ$) и осеннего ($L_s \sim 180^\circ$) равноденствия.

Значения объемных интенсивностей излучения полос Герцберга I, соответствующих переходу (1), были рассчитаны по формуле

$$i_{\nu' \nu''} (\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}) = [\text{O}_2^*] A_{\nu' \nu''}, \quad (8)$$

где $[\text{O}_2^*]$ (см^{-3}) – рассчитанная концентрация электронно-возбужденного кислорода $\text{O}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+)$ в зависимости от высоты h [17]; $A_{\nu' \nu''}$ (с^{-1}) – коэффициент Эйнштейна, соответствующий спонтанному излучательному переходу с колебательного уровня ν' вышележащего состояния $\text{A}^3\Sigma_u^+$ на колебательный уровень ν'' нижележащего состояния $\text{X}^3\Sigma_g^-$ [16].

На рис. 3 показаны рассчитанные высотные распределения объемных интенсивностей излучения полос Герцберга I, связанных со спонтанным переходом $\text{A}^3\Sigma_u^+(\nu' = 6) \rightarrow \text{X}^3\Sigma_g^-(\nu'' = 3)$ (1) на северных широтах (67°N) и в экваториальной зоне Марса для точек весеннего и осеннего равноденствия (рис. 3а), на средних широтах Земли (55.7°N) для 1, 4, 7, 10 месяцев 1980 и 1981 гг. (рис. 3б), в экваториальной зоне и в северных тропиках Земли (23°N) для зимнего, весеннего, летнего и осеннего периода (рис. 3в). По осям X приведены значения объемной интенсивности излучения $i (\text{см}^{-3} \text{с}^{-1})$, по осям Y отложены высоты в километрах. Как видно из рис. 3а, для атмосферы Марса наблюдается значительный разброс значений объемных интенсивностей излучения полосы Герцберга I в отличие от значений абсолютных концентраций атомарного кислорода, что объясняется вариациями температуры в зависимости от широты.

На рис. 4а и 5а 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 7-дневной миссии в декабре 1992 г. [3]. По осям Y отложены значения интенсивностей в рэлях/ангстрем ($R/\text{\AA}$) ($1 \text{ P} = 10^6 \text{ фотон/см}^2 \text{с}$), по осям X отложены длины волн в ангстремах ($\lambda(\text{\AA})$). Каждая двойка цифр над пиками свечения обозначает колебательные уровни ($\nu' - \nu''$) при излучательном переходе (1).

Рассчитанные значения интенсивности излучения $I (\text{см}^{-2} \text{с}^{-1})$ (гистограммы) для различных полос Герцберга I, обусловленных переходом (1), для средних широт Земли (55.7°N) для 1 месяца 1980 и 1981 гг. (рис. 4б), а также в экваториальной зоне и в северных тропиках Земли (23°N) для осеннего периода (рис. 4в) выполнены в этом же диапазоне длин волн. При этом при пересчете объемной интенсивности излучения $i_{\nu' \nu''}$ в интенсивность излучения $I_{\nu' \nu''}$ используется приближение оптически тонкого слоя, т.е. пренебрегается поглощением фотонов внутри слоя.

Как видно из сравнения теоретически рассчитанных значений интенсивностей свечения с экспериментальными данными, наблюдается хорошая корреляция результатов расчета с экспериментом. Так, излучательные переходы (1) с колебательных уровней $\nu' = 5, 6, 7$ состояния $\text{A}^3\Sigma_u^+$ дают доминирующий вклад в свечение в диапазоне 270–310 нм. Особо среди них выделяются переходы 5–3, 5–4, 6–2, 6–3, 6–4, 7–2, 7–3.

Аналогично на рис. 5б представлены рассчитанные значения интенсивностей излучения для атмосферы Марса для северных

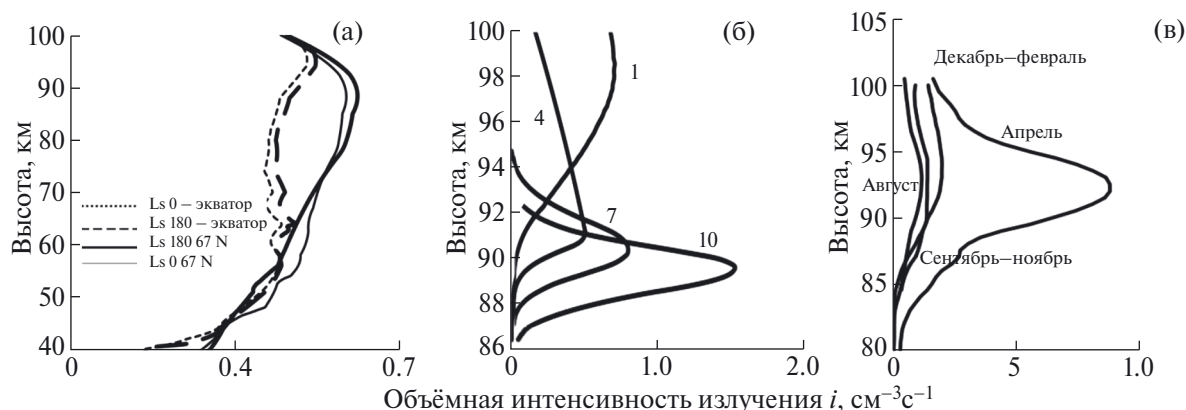


Рис. 3. Высотные профили объемных интенсивностей излучения полос Герцберга I. Обозначения аналогично рис. 2.

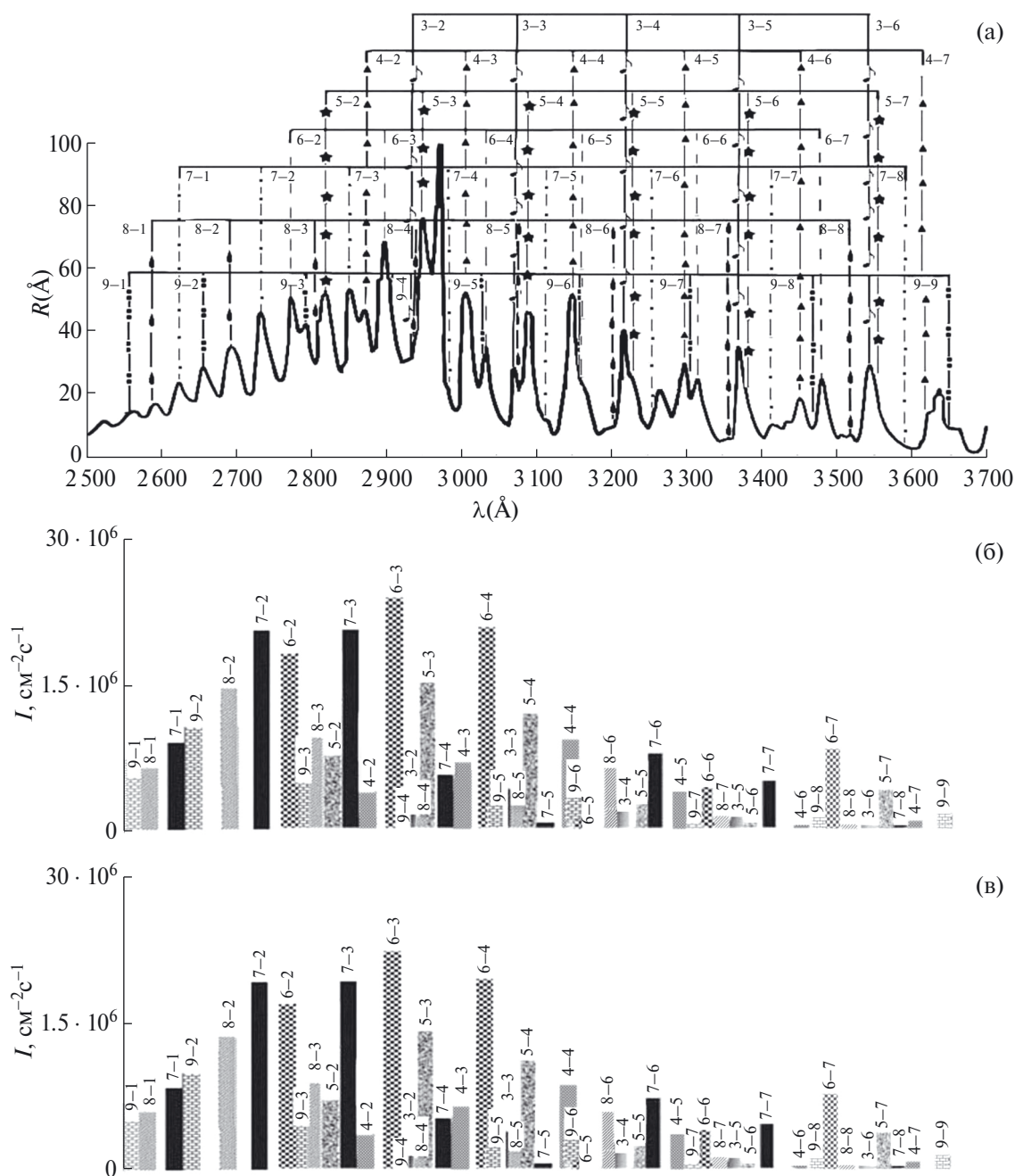


Рис. 4. Экспериментальные и рассчитанные значения интегральной светимости полос Герцберга I для верхней атмосферы Земли.

широт (67°N) для точки осеннего равноденствия ($L_s \sim 180^\circ$). Для условий Марса мы можем видеть изменение относительного вклада колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ в свечение полос Герцберга I. Так, из рисунка видно, что вклад колебательных уровней $v' = 5, 6$ уменьшается, а у колебательных уровней $v' = 8, 9$ увеличивается. Объясняется это особенностями гашения на молекулах углекислого газа.

Кроме того, на рис. 6а представлены рассчитанные значения общей интегральной светимости всей рассмотренной системы полос Герцберга I в диапазоне 250–370 нм ($I, \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, гистограммы): для атмосферы Марса для широты 67°N и экватора во время осеннего и весеннего равноденствий северной широты, $L_s \sim 180^\circ$ и $L_s \sim 0^\circ$ (рис. 6а). Результаты расчетов показали, что максимальные значения $\sim 0.34 \text{ кР}$ общей интегральной светимости для

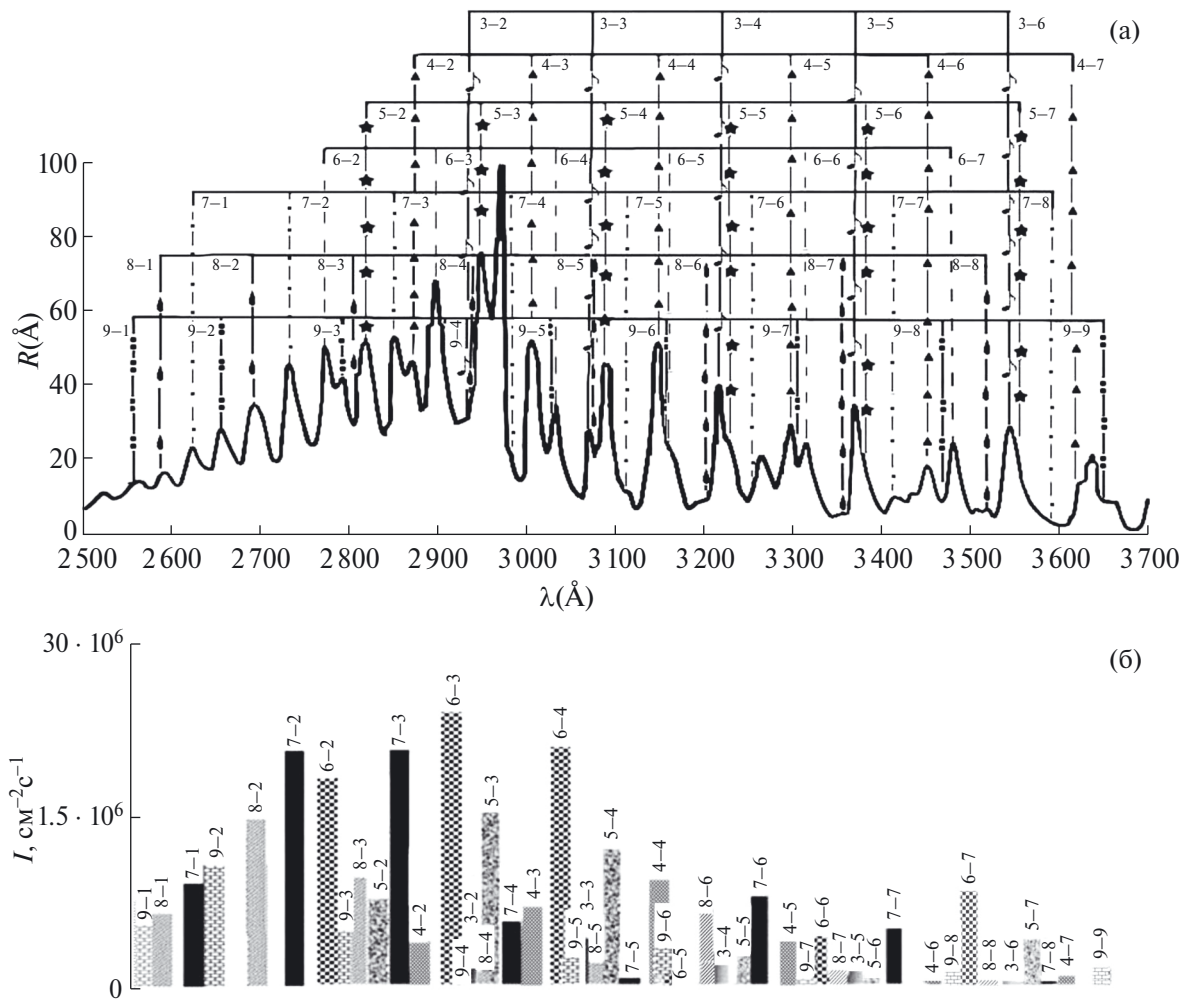


Рис. 5. Рассчитанные значения интегральной светимости полос Герцберга I для верхней атмосферы Марса (б) сравниваются с экспериментальными данными с шаттла «Дискавери» (STS-53) (а).

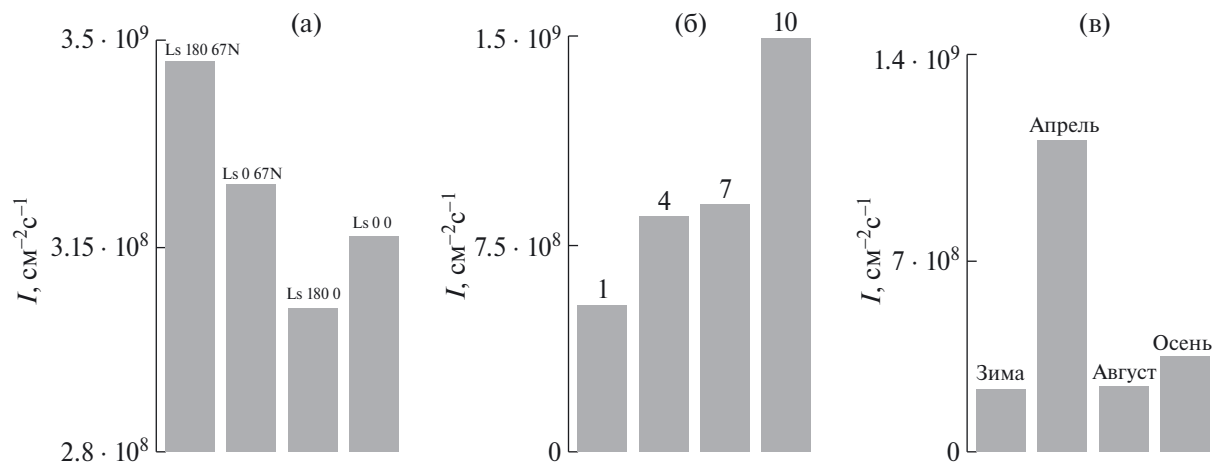


Рис. 6. Значения общей интегральной светимости для верхних атмосфер Марса (а) и Земли (б, в). Обозначения аналогично рис. 2.

рассмотренных четырех случаев атмосферы Марса наблюдаются в точке осеннего равноденствия на северных широтах ($L_s \sim 180^\circ$, 67° N).

Аналогичные результаты расчетов общей интегральной светимости всей рассмотренной системы полос Герцберга I в диапазоне 250–370 нм в атмосфере Земли представлены для рассмотренных месяцев года для средних широт (55.7° N) (рис. 6б), в экваториальной зоне и в северных тропиках (23° N) (рис. 6в). Расчеты показали, что на средних широтах максимальные значения общей интегральной светимости ~ 1.5 кР получаются для октября, а в экваториальной зоне и в северных тропиках аналогичные значения получаются для весеннего месяца апреля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание различных газов в атмосферах планет во многом определяет тепловой баланс атмосферы. Анализ спектров свечения атмосфер планет позволяет оценивать данное содержание основных и малых компонентов в этих атмосферах. Сравнение теоретически рассчитанных значений интенсивностей свечения с экспериментальными данными, полученными с космических летательных аппаратов, позволяет оценить понимание особенности атомно-молекулярных процессов, протекающих на разных высотах атмосфер планет.

На основании экспериментальных данных по профилям концентрации атомарного кислорода и температуры в атмосфере Земли на средних широтах (55.7° N) и в экваториальной зоне и в северных тропиках (23° N) для зимнего, весеннего, летнего и осеннего периодов проведены расчеты объемных и интегральных интенсивностей свечения полос Герцберга I в диапазоне длин волн 250–370 нм. Проведено сравнение рассчитанных значений со спектральными измерениями спектрографом с космического шаттла “Дискавери” (STS-53) [3]. Показано, что наблюдается хорошая корреляция результатов расчета с экспериментальными данными. Так, излучательные переходы (1) с колебательных уровней $v' = 5, 6, 7$ состояния $A^3\Sigma_u^+$ дают доминирующий вклад в свечение в диапазоне 270–310 нм.

Аналогичные расчеты интенсивностей свечения полос Герцберга I в диапазоне длин волн 250–370 нм проведены для условий Марса для широты 67° и экватора при $L_s \sim 180^\circ$ и $L_s \sim 0^\circ$ N, т.е. осеннего и весеннего равноденствий. Получено, что для условий Марса происходит

изменение относительного вклада колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ в свечение полос Герцберга I. Так, вклад колебательных уровней $v' = 5, 6$ уменьшается, а у колебательных уровней $v' = 8, 9$ увеличивается по сравнению с атмосферой Земли. Объясняется это особенностями гашения на молекулах углекислого газа.

Представлены рассчитанные значения общей интегральной светимости всей рассмотренной системы полос Герцберга I для рассмотренных месяцев года Земли и Марса. Показано, что на средних широтах Земли максимальные значения общей интегральной светимости порядка 1.5 кР получаются для осеннего месяца, в экваториальной зоне — для весеннего. На северных широтах Марса максимальные значения в точке осеннего равноденствия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кораблев О. И.* Новые методы спектроскопических исследований планетных атмосфер с космических аппаратов: Диссертация и автореферат по ВАК РФ 01.03.04. 2003.
2. *Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю.* Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
3. *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.
4. *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*. 2013. V. 223. Iss. 1. P. 609–614.
5. *Montmessina F., Korabev O., Lefèvre F. et al.* SPICAM on Mars Express: A 10 year in-depth survey of the Martian atmosphere // *Icarus*. 2017. V. 297. P. 195–216.
6. *Краснопольский В. А., Крысько А. А., Рогачев В. Н. и др.* Спектроскопия свечения ночного неба Венеры на АМС «Венера-9» и «Венера-10» // *Космические исследования*. 1976. Т. 14. № 5. С. 789–795.
7. *Krasnopolsky V. A.* Venus spectroscopy in the 3000–8000 Å region by Veneras 9 and 10 // *Eds. Hunten D. M., Colin L., Donahue T. M., Moroz V. I.* Venus. 1983. University of Arizona Press. Tucson. AZ. P. 459–483.
8. *Lawrence G. M., Barth C. A., Argabright V.* Excitation of the Venus Night airglow // *Science*. 1977. V. 195. P. 573–574.
9. *Slangier T. G., Black G.* The $O_2(C^3\Delta_u \rightarrow a^1\Delta_g)$ bands in the Nightglow spectrum of Venus // *Geophys. Res. Lett.* 1978. V. 5. Iss. 11. P. 947–948.

10. *Fedorova A.A., Lefevre F., Guslyakova S. et al.* The O₂ Nightglow in the martian atmosphere by SPICAM onboard of Mars-Express // *Icarus*. 2012. V. 219. Iss. 2. P. 596–608.
11. *Bertaux J.-L., Gondet B., Lefevre F. et al.* First detection of O₂ 1.27 μ m Nightglow emission at Mars with OMEGA/MEX and comparison with general circulation model predictions // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. Art.ID. E00J04.
12. *Кириллов А.С.* Модель населенностей колебательных уровней состояний молекулы кислорода, исходных для полос Герцберга, на высотах нижней термосферы и мезосферы // *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2012. Т. 52. № 2. С. 258–264.
13. *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.
14. *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.
15. *Krasnopolsky V.A.* Excitation of the oxygen Nightglow on the terrestrial planets // *Planet. Space Sci.* 2011. V. 59. Iss. 8. P. 754–756.
16. *Bates D.R.* Oxygen band system transition arrays // *Planet. Space Sci.* 1989. V. 37. N. 7. P. 881–887.
17. *Антоненко О.В., Кириллов А.С.* Моделирование спектра свечения ночного неба Земли для системам полос, излучаемых при спонтанных переходах между различными состояниями молекулы электронно-возбужденного кислорода // *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2021. Т. 85. № 3. С. 310–314.
18. *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 аэронавтика*. 2022. Т. 62. № 5. С. 661–670.
19. *Перминов В.И., Семенов А.И., Шефов Н.Н.* Дезактивация колебательных состояний молекул гидроксила атомарным и молекулярным кислородом в области мезопаузы // *Геомагнетизм и аэронавтика*. 1998. Т. 38. № 6. С. 642–645.
20. *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.
21. *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.
22. *Семенов А.И., Перцев Н.Н., Шефов Н.Н. и др.* Расчет высотных профилей температуры и концентрации атмосферы на 30–110 км // *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2004. Т. 44. № 6. С. 835–840.