

Исследование собственного ночного свечения атмосфер Земли и Марса в различных полосах молекулярного кислорода методом дистанционного зондирования из космоса

О. В. Антоненко, А. С. Кириллов

Полярный геофизический институт, Анатиты, Мурманская обл., 184209, Россия
E-mail: antonenko@pgia.ru

Представлены результаты теоретических расчётов свечения возбуждённого молекулярного кислорода (O_2) в ночном небе атмосферы Земли и Марса. Представлены профили концентрации атомарного кислорода (O) на средних широтах Земли ($55,7^\circ$ с. ш.), в области экватора и на северных тропиках ($23,5^\circ$ с. ш.). Профили температуры, используемые в расчётах, получены из многолетних (1960–2000) измерений на высотах 30–110 км. Для профилей концентрации азота (N_2), O_2 применялись данные из модели MSIS-90 (*англ.* Mass Spectrometer – Incoherent Scatter, 1990 г.). Также представлены высотные профили O для атмосферы Марса для широты экватора; для профилей концентрации углекислого газа (CO_2) и температуры использовались данные согласно модели GCM (*англ.* General Circulation Model) французской Лаборатории динамической метеорологии (*фр.* Laboratoire de Météorologie Dynamique – LMD), называемой LMD-MGCM. Вычислена интенсивность свечения полос Герцберга I, Чемберлена и атмосферных полос на средних широтах и в экваториальной зоне Земли, а также для экваториальной зоны Марса. Расчёты выполнялись по экспериментальным данным о концентрации атомарного кислорода для указанных широт планет. Обсуждается корреляция результатов этих вычислений с экспериментальными данными по ночному свечению O_2 на Земле, полученными с космических шаттлов «Индевор» и «Дискавери». Показано, что наблюдается хорошее согласие теоретических оценок с экспериментальными данными для рассмотренных широт Земли.

Ключевые слова: молекулярный кислород, интенсивность свечения, полосы Герцберга и Чемберлена, атмосферные полосы, средние широты, экваториальная зона, космическая транспортная система, корреляция результатов

Одобрена к печати: 18.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-359-371

Введение

Одними из основных методов исследования излучения верхних слоёв атмосфер планет являются методы оптической спектроскопии. Спектроскопия открывает широкие возможности для изучения компонентов газовых сред, в частности, возможность измерять малые составляющие атмосферных газов и их изотопный состав (Кораблёв, 2013). При этом диапазон спектра регистрируемого электромагнитного излучения начинается от коротковолнового ультрафиолетового (УФ) (100–200 нм) и может продолжаться до «теплого» инфракрасного (ИК) (25–50 мкм). Регистрация эмиссий в ИК-диапазоне спектра позволяет отождествлять различные колебательно-колебательные переходы в молекулах, тем самым указывая как на излучающие атмосферные составляющие, так и давая информацию о скорости образования колебательно-возбуждённых молекул, находящихся в основном электронном состоянии. Аналогично регистрация свечения в видимом и УФ-диапазонах спектра указывает на особенности образования электронно-возбуждённых молекул на различных высотах атмосфер планет в результате разных химических реакций, взаимодействия молекул и атомов с высокоэнергичными частицами, вторгающимися в атмосферу, различного рода разрядов и т. п.

Большое значение для исследования атмосфер планет имеют спектрометрические измерения с космических летательных аппаратов (КЛА). Для изучения атмосферы Земли, напротив, приоритетом являются наземные наблюдения. Однако вследствие специфических

свойств прозрачности земной атмосферы возможность регистрации возникающего излучения с её поверхности ограничена его видимым и ближним инфракрасным участком (Шефов и др., 2006). Наземные наблюдения могут быть дополнены регистрацией из космоса с использованием высокопроизводительного оборудования в течение ограниченного времени пролёта мимо области свечения атмосферы. Один из способов таких измерений — это применение космического шаттла, или космической транспортной системы (*англ.* Space Transportation System — STS). В настоящей работе используются экспериментальные данные с космических шаттлов «Индевор» (*англ.* Endeavour) (на протяжении его 12-дневной миссии STS-69 в сентябре 1995 г.) и «Дискавери» (*англ.* Discovery) (на протяжении его 7-дневной миссии STS-53 в январе 1992 г.). На *рис. 1* дано схематичное изображение с телескопа слежения шаттла аризонского эксперимента GLO (*англ.* Arizona Airglow Experiment) (гиперспектральный тепловизор, состоящий из набора спектрографов), показывающее слой свечения Земли и звёзд над краем свечения атмосферы.

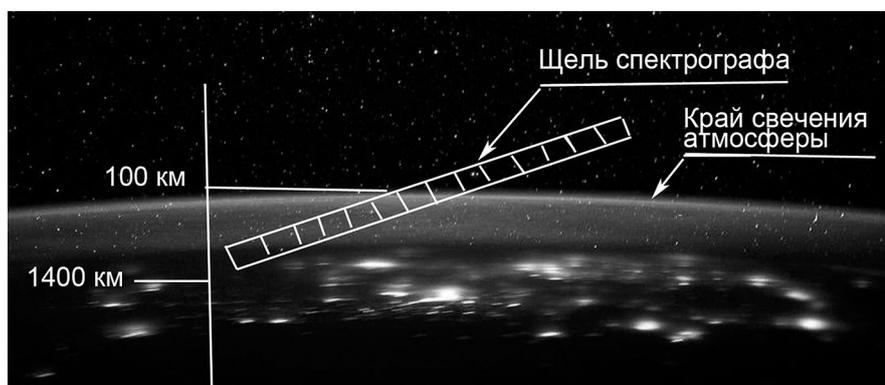
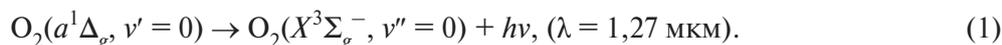


Рис. 1. Схематичное изображение с телескопа слежения шаттла аризонского эксперимента GLO, показывающее слой свечения Земли и звёзд над краем свечения атмосферы

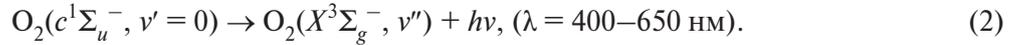
Тот факт, что на высотах верхней атмосферы Земли происходят химические реакции, следствием которых является собственное излучение ночной атмосферы нашей планеты, стал очевиден к концу второго десятилетия XX в. (Шефов и др., 2006). В отличие от ночной полярной ионосферы, где неупругое взаимодействие атомов и молекул с высокоэнергичными частицами приводит к образованию электронно-возбуждённых и колебательно-возбуждённых частиц, излучающих в различных диапазонах спектра, на высотах 80–110 км достаточно эффективно протекают тройные столкновения с участием двух атомов кислорода, результатом которых становится образование электронно-возбуждённых молекул кислорода. Наземные измерения позволили зарегистрировать свечение полос Герцберга I и Чемберлена, располагающихся в УФ-диапазоне, а также свечение атмосферных полос в ИК-диапазоне (Роч, Гордон, 1977; Хвостиков, 1937; Шефов и др., 2006).

Что касается спектральных исследований атмосферы Марса, то они начались ещё в 70-х гг. прошлого века. В ходе пролётов КЛА Mariner-6 и Mariner-7 были получены первые данные по дневному свечению атмосферы Марса (Barth et al., 1971). Измерение УФ-спектра свечения показало наличие полос электронно-возбуждённой молекулы угарного газа CO и иона молекулы углекислого газа CO_2^+ (Barth et al., 1971). В дальнейшем с помощью измерений на КЛА Mars Express были открыты УФ-авроральные свечения в атмосфере Марса (Bertaux et al., 2005), которые аналогично были связаны с полосами CO и CO_2^+ .

Регистрация свечения ночного неба атмосферы Марса на КЛА Mars Express в основном проходила в ИК-диапазоне (Bertaux et al., 2012; Fedorova et al., 2012; González-Galindo et al., 2024). Измерения проводились на атмосферной ИК-полосе 1,27 мкм, излучаемой при спонтанном переходе:

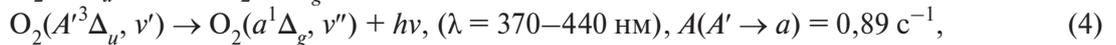
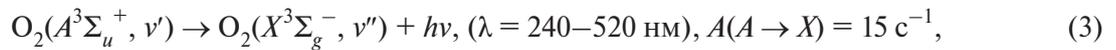


Недавно были опубликованы результаты измерений ночного свечения атмосферы Марса, полученные на КЛА Trace Gas Orbiter в видимом диапазоне (Gérard et al., 2024). Как было показано авторами, регистрируемый спектр совпадает с измерениями в ночной атмосфере Венеры, выполненными на КЛА «Венера-9» и «Венера-10» (Краснопольский и др., 1976) и Venus Express (Migliorini et al., 2013), и связан со свечением в видимом диапазоне полос Герцберга II молекулярного кислорода, излучаемых при спонтанных переходах с нулевого колебательного уровня синглетного состояния Герцберга:



Образование электронно-возбуждённого молекулярного кислорода, излучающего эмиссии в различных спектральных диапазонах, происходит в тройных столкновениях с участием двух атомов кислорода и третьей частицы. В атмосфере Земли образование атомарного кислорода O за счёт процесса диссоциации молекулярного кислорода O₂ солнечным УФ-излучением происходит на высотах выше 80 км, в атмосфере Марса идёт образование O за счёт процесса диссоциации CO₂ на высотах выше 40 км.

В настоящей работе представлены расчёты интенсивности полос, излучаемых в ночном небе атмосферы Земли и Марса при спонтанных переходах с электронно-возбуждённых состояний A³Σ_u⁺, A'³Δ_u, b¹Σ_g⁺, т. е. полос Герцберга I (3), полос Чемберлена (4) и атмосферных полос (5):



причём у первых двух систем полос (3) и (4) наиболее интенсивные полосы располагаются в УФ-области, а у третьей системы (5) — в ИК-области. В уравнениях (3)–(5) A(A → X), A(A' → a), A(b → X) — характерная вероятность переходов (коэффициенты Эйнштейна) для систем полос Герцберга I и Чемберлена, атмосферных полос соответственно.

Цель данной работы — сопоставление интенсивности свечения полос (3)–(5), теоретически рассчитанной как для атмосферы Земли, так и атмосферы Марса, с экспериментальными данными по интенсивности ночного свечения молекулярного кислорода O₂^{*}, полученными с космических шаттлов «Индевор» и «Дискавери».

Особенности возникновения процессов собственного излучения ночной атмосферы

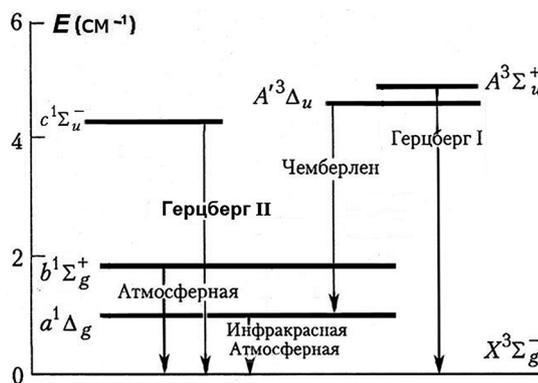
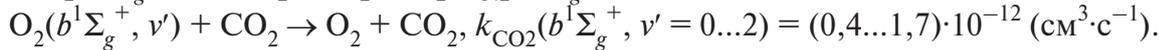
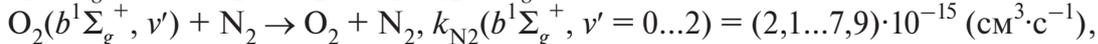
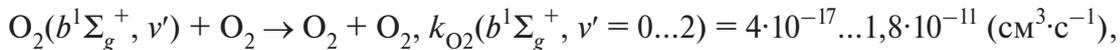
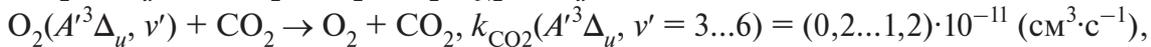
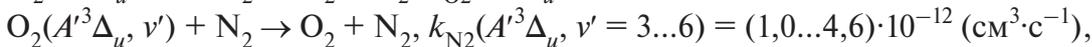
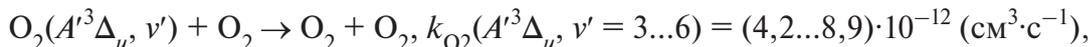
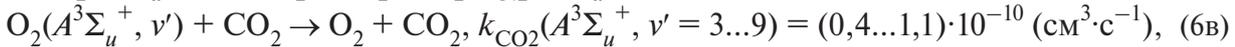
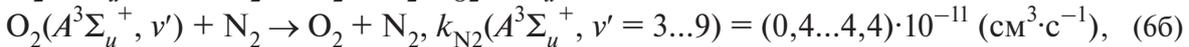
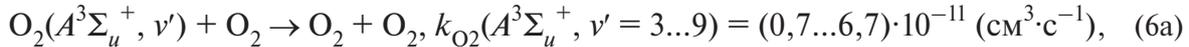


Рис. 2. Схема электронно-возбуждённых состояний и различных систем излучаемых полос молекулы O₂. Инфракрасные атмосферные полосы (1), полосы Герцберга II (2), Герцберга I (3), Чемберлена (4), атмосферные полосы (5). Все приведённые состояния находятся ниже энергии диссоциации молекулы O₂: 41 300 см⁻¹ (8065 см⁻¹ = 1 эВ). По оси ординат E (см⁻¹)/10⁴

На рис. 2 схематично представлены системы спонтанных излучательных переходов между различными электронными состояниями молекулярного кислорода: полосы Герцберга I (3),

Чемберлена (4), атмосферные полосы (5). Все приведённые состояния находятся ниже энергии E диссоциации молекулы O_2 : $41\,300\text{ см}^{-1}$ ($8065\text{ см}^{-1} = 1\text{ эВ}$).

Поскольку переходы между указанными выше состояниями дипольно-запрещённые и излучательное время жизни высоко, то при расчётах концентрации электронно-возбуждённого кислорода необходимо учитывать гашение состояний молекул $A^3\Sigma_u^+$, $A^3\Delta_u$, $b^1\Sigma_g^+$ не только при излучательных переходах, но и при неупругих столкновениях с молекулами O_2 , N_2 для атмосферы Земли (Шефов и др., 2006), с молекулами CO_2 для атмосферы Марса (Кораблёв, 2013). Поэтому при вычислениях нужно учитывать следующие процессы столкновений с атмосферными составляющими:



Константы гашения при столкновениях с молекулами O_2 , N_2 , CO_2 для указанных семи колебательных уровней состояния $A^3\Sigma_u^+$ и четырёх уровней состояния $A^3\Delta_u$ берутся согласно теоретическим расчётам (Kirillov, 2014), для трёх уровней состояния $b^1\Sigma_g^+$ — согласно исследованиям (Кириллов, 2012; Kirillov, 2013).

Измерения абсолютных значений интенсивности свечения полос в УФ-области спектра, в частности, полос Герцберга I (3) и Чемберлена (4), проводились во многих работах (Шефов и др., 2006). Как следует из таких измерений для данной спектральной области, общая интенсивность системы полос Герцберга I составляет порядка 500–600 Рл, а интенсивность системы полос Чемберлена слабее и равна около 200 Рл (Шефов и др., 2006).

Величины интенсивности полос атмосферной системы (5) различаются между собой более чем на порядок. Наибольшая интенсивность у полосы (0-0) ($v' = 0 \rightarrow v'' = 0$), имеющей длину волны 761,9 нм. Второй по значимости оказывается полоса (0-1), имеющая длину волны 864,5 нм. Другие полосы в излучении атмосферной системы наблюдаются слабо и интенсивность их мала (Шефов и др., 2006). Исследование излучения полос этой системы в верхней атмосфере показало, что область высоты свечения этих полос 90–100 км (Шефов и др., 2006). Для полосы 761,9 нм имеется значительное резонансное рассеяние атмосферой, поэтому свечение атмосферной полосы (0-0) отмечается с поверхности Земли более чем на порядок ослабленным. Однако излучение этой полосы наиболее яркое в ночном свечении атмосферы, регистрируемом с орбиты КЛА. Оно в 20 раз ярче полосы (0-1), которая регулярно отслеживается наземными наблюдателями. Таким образом, интенсивность излучения атмосферной полосы (0-0) молекулярного кислорода может использоваться как индикатор динамической активности в эмиссионном слое ночного свечения.

Корреляция данных по интенсивностям свечения, полученных с космических шаттлов «Индевор» и «Дискавери», с рассчитанными значениями

Расчёты интенсивности излучения I ($\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) (гистограммы) для различных систем полос как для атмосферы Земли, так и для атмосферы Марса выполнялись на основе экспериментальных данных о высотных профилях концентрации O . На рис. 3а (см. с. 363) представ-

лены концентрации атомарного кислорода для 1-го, 4-го, 7-го и 10-го месяца по данным, основанным на измерениях звенигородской обсерватории Института физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН (ИФА РАН) на средних широтах ($55,7^\circ$ с. ш.) при индексе солнечной активности $F_{10,7}$, равном 75 sfu (*англ.* solar flux unit) (1976 и 1986 гг.) (Шефов и др., 2006). На *рис. 3б* приведены высотные профили O в районе экватора и северных тропиков ($23,5^\circ$ с. ш.) Земли (зимний, весенний, летний и осенний сезоны 1995 г.). Эти данные в области экватора и северных тропиков были получены с помощью зондирования атмосферы с использованием системы OSIRIS (*англ.* Optical Spectrograph and InfraRed Imager System) на спутнике Odin (Sheese et al., 2011). При расчётах концентрации электронно-возбуждённого молекулярного кислорода для атмосферы Земли использовались высотные профили температуры, составленные на основе данных многолетних (1960–2000) измерений профилей температуры на высотах 30–110 км (Шефов и др., 2006).

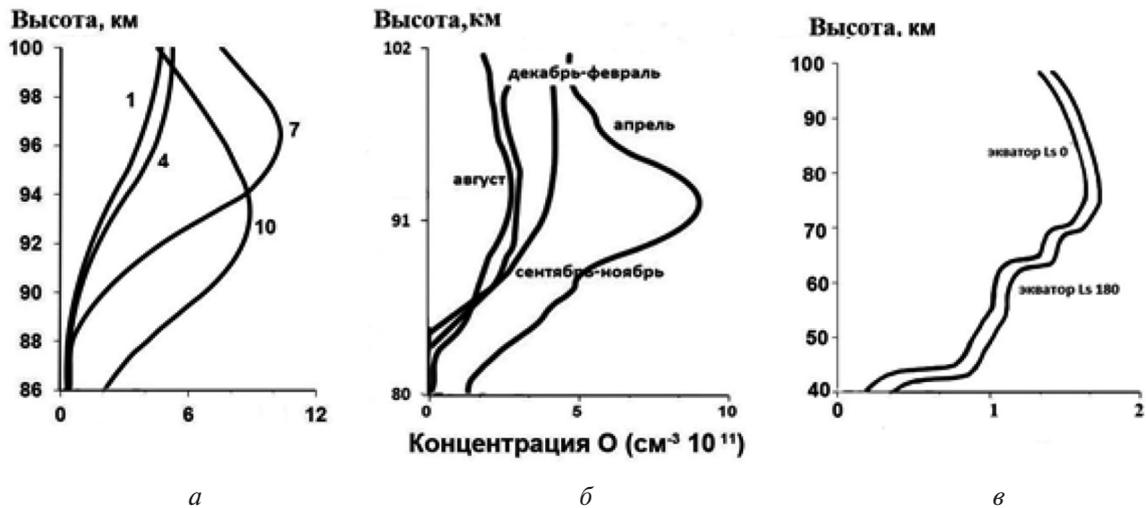


Рис. 3. Высотные профили концентрации атомарного кислорода: *а* — для средних широт Земли; *б* — экватора и северных тропиков Земли; *в* — атмосферы Марса

На *рис. 3в* представлены высотные профили концентрации атомарного кислорода для экваториальной зоны Марса во время весеннего (долгота Солнца $L_S \sim 0^\circ$) и осеннего ($L_S \sim 180^\circ$) равноденствий. Значения концентрации O получены из модели LMD-MGCM (LMD — *фр.* Laboratoire de Météorologie Dynamique; MGCM — *англ.* Mars General Circulation Model) (Gagné et al., 2012). Высотные профили температуры, используемые при вычислениях концентрации электронно-возбуждённого кислорода в атмосфере Марса, также были рассчитаны по модели LMD-MGCM.

Как видно из *рис. 3а* и *3б*, в средних широтах Земли наибольшая концентрация атомарного кислорода наблюдается на высотах 93–97 км во время летнего и осеннего периодов (Шефов и др., 2006), а в области экватора и северных тропиков Земли — на высоте ~ 93 км в весенний период. Для экваториальной зоны Марса наибольшая концентрация в области высот 70–80 км с максимумом на ~ 73 км (см. *рис. 3в*).

На *рис. 4* (см. с. 364) представлены рассчитанные высотные профили объёмной интенсивности свечения i полосы Герцберга I (6-3) для средних широт (см. *рис. 4а*) и области экватора (см. *рис. 4б*) в атмосфере Земли, для экваториальной зоны Марса (см. *рис. 4в*) для осеннего равноденствия ($L_S \sim 180^\circ$). На *рис. 5* (см. с. 364) аналогично приводятся рассчитанные значения объёмной интенсивности свечения i полосы Чемберлена (6-3) для средних широт (см. *рис. 5а*) и области экватора (см. *рис. 5б*) в атмосфере Земли, для экваториальной зоны Марса (см. *рис. 5в*). И наконец, на *рис. 6* (см. с. 364) также представлены значения объёмной интенсивности свечения i атмосферной полосы (0-0) для средних широт Земли (см. *рис. 6а*), области экватора Земли (см. *рис. 6б*), экваториальной зоны Марса (см. *рис. 6в*).

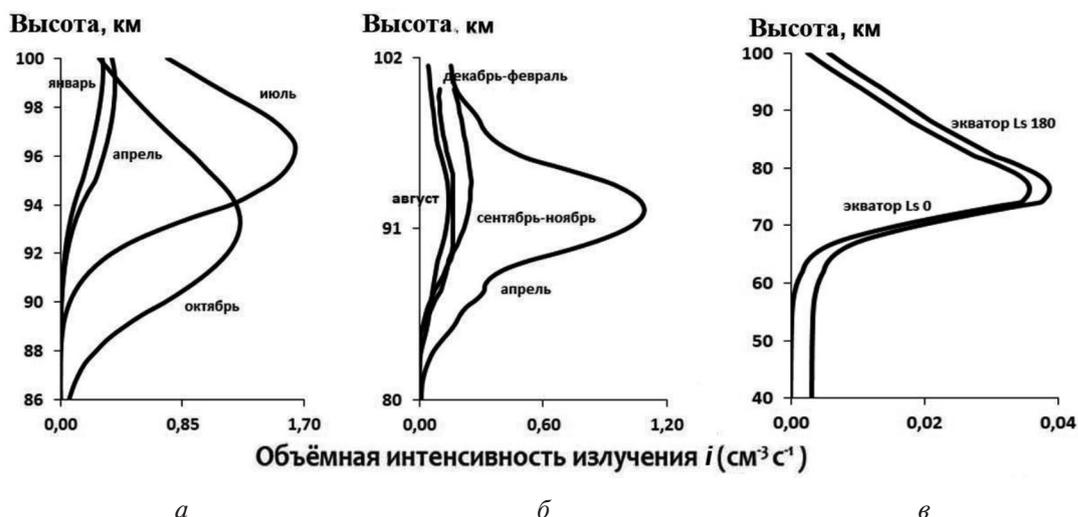


Рис. 4. Высотные профили объёмной интенсивности i для полосы (6-3) Герцберга I: a — для средних широт Земли; b — экватора и северных тропиков Земли; v — атмосферы Марса

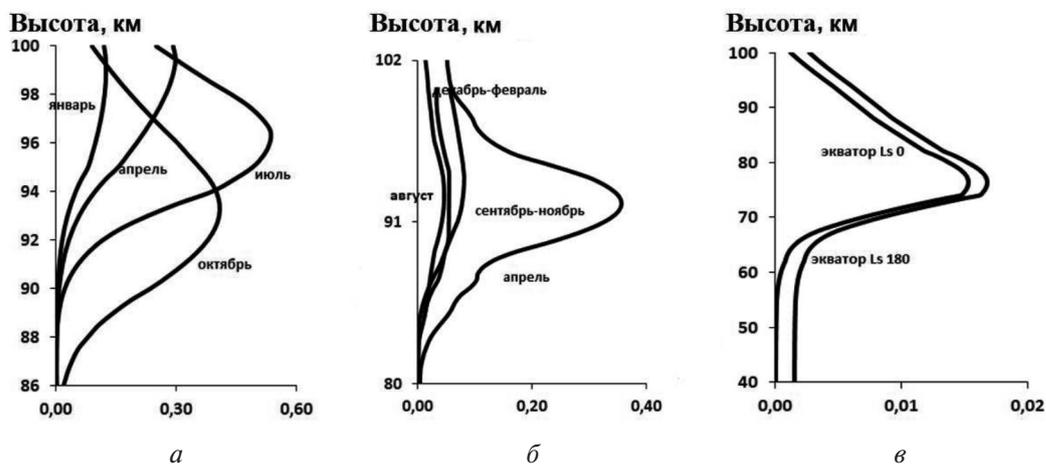


Рис. 5. Высотные профили объёмной интенсивности i для полосы (6-3) Чемберлена: a — для средних широт Земли; b — экватора и северных тропиков Земли; v — атмосферы Марса

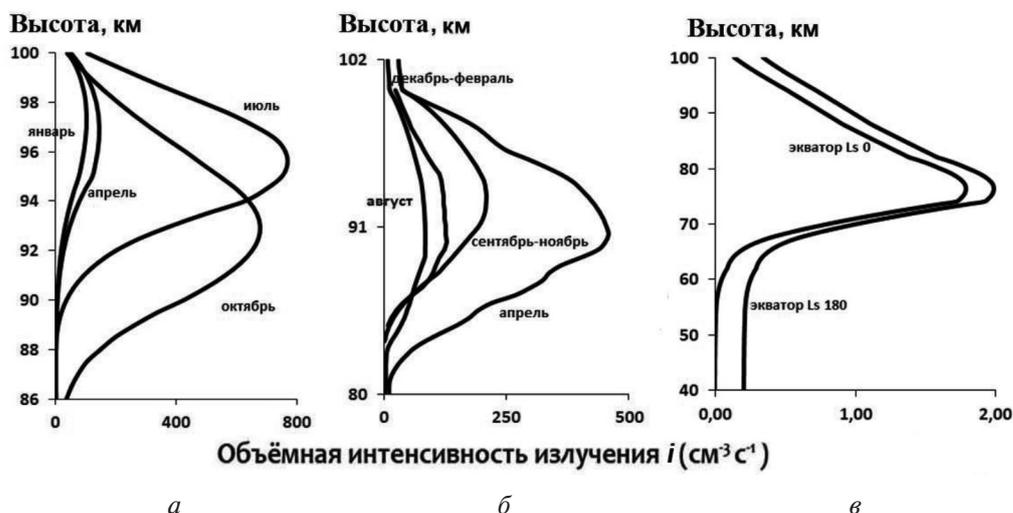
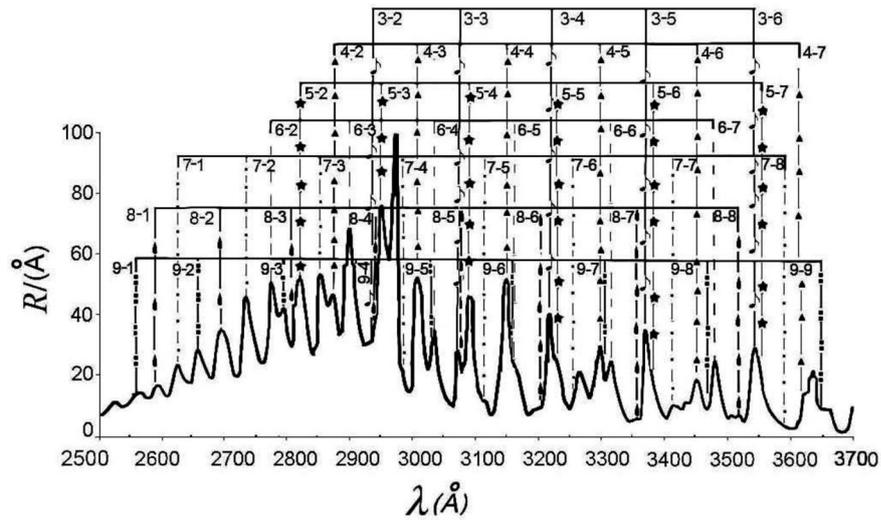
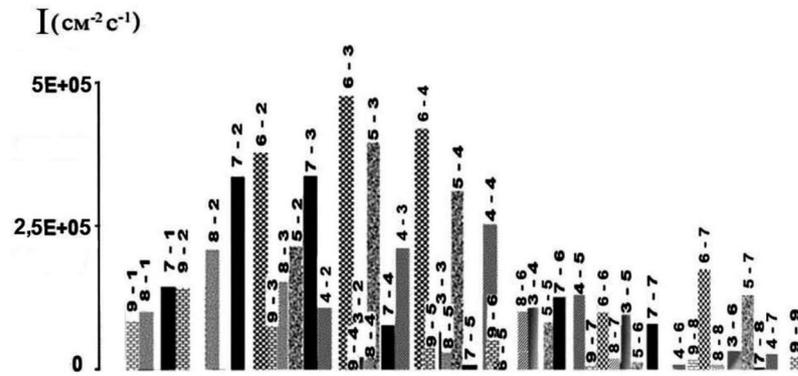


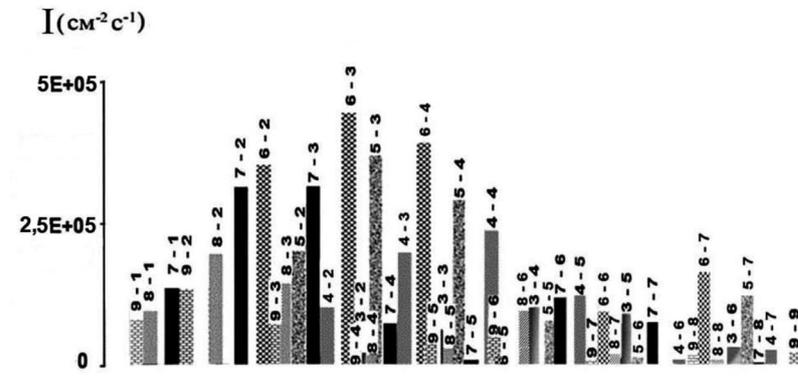
Рис. 6. Высотные профили объёмной интенсивности i для атмосферной полосы (0-0): a — для средних широт Земли; b — экватора и северных тропиков Земли; v — атмосферы Марса



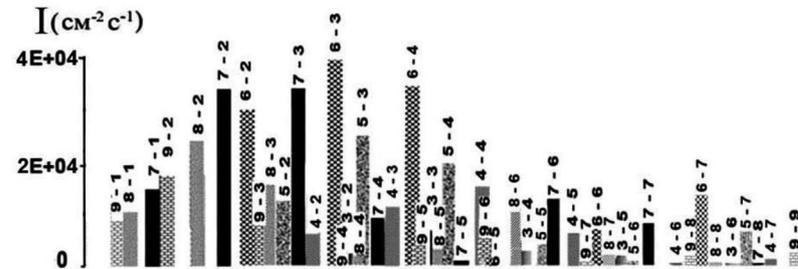
a



б



в



г

Рис. 7. Фрагмент спектра свечения в диапазоне 250–370 нм (а) (по оси ординат — интенсивность, по оси абсцисс — длина волны λ), гистограммы для полос Герцберга I: б — средних широт Земли; в — для экватора и северных тропиков Земли; г — для атмосферы Марса

В настоящей работе также проведены расчёты интегральной интенсивности свечения I различных полос Герцберга I, Чемберлена и атмосферных полос O_2 . Результаты вычисления I ($cm^{-2} \cdot c^{-1}$) (гистограммы) для полос Герцберга I приведены на *рис. 7* (см. с. 365), для полос Чемберлена — на *рис. 8* и для атмосферных полос — на *рис. 9* (см. с. 367). На каждом из рисунков представлены рассчитанные гистограммы для средних широт, экваториальной зоны и северных тропиков Земли, а также для экваториальной зоны Марса. Также приведены фрагменты усреднённых спектров свечения ночного неба, измеренных спектрографами с космических шаттлов (Broadfoot, Bellaire, 1999), что позволяет сравнить теоретически вычисленную интенсивность свечения с экспериментальными данными.

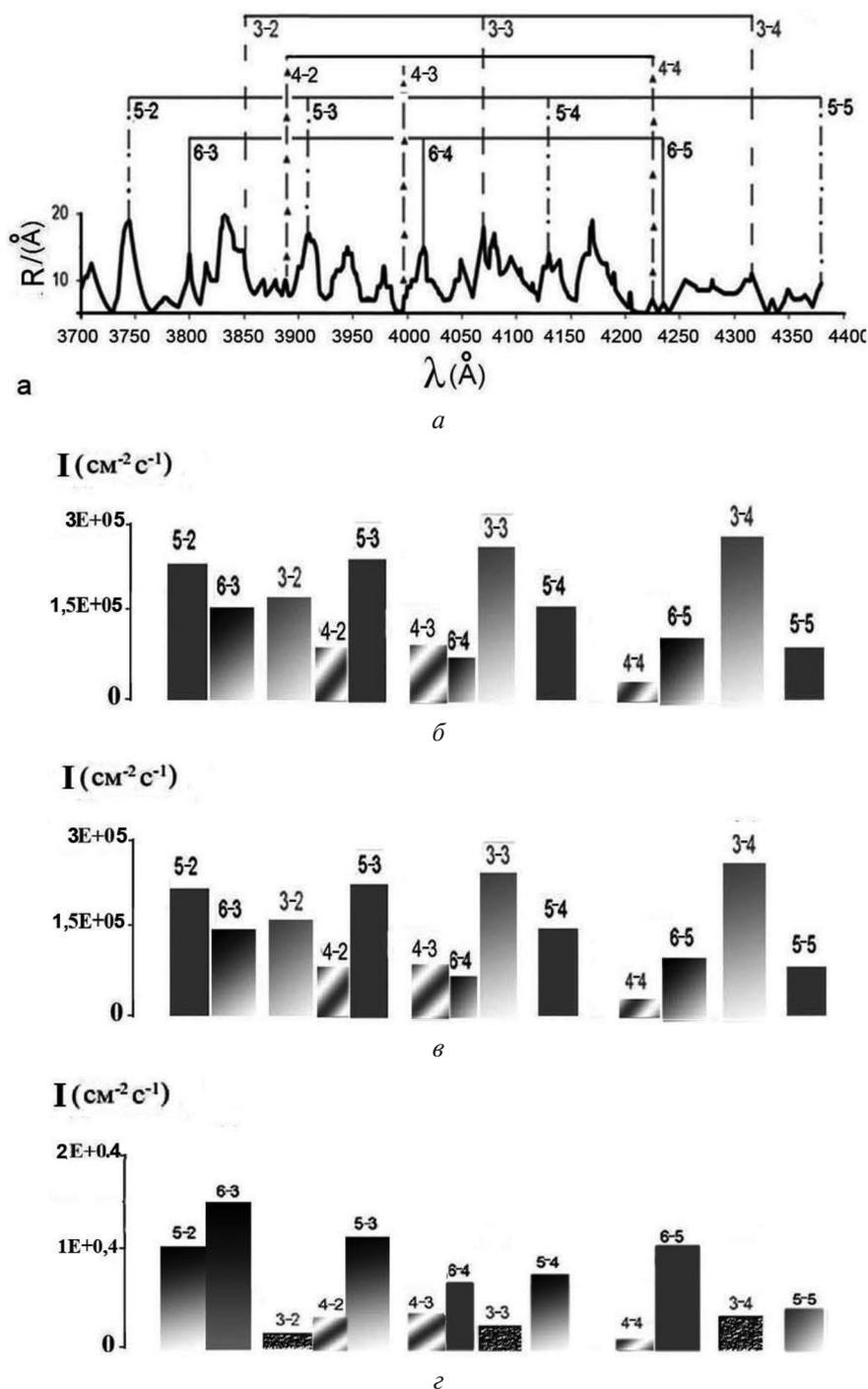
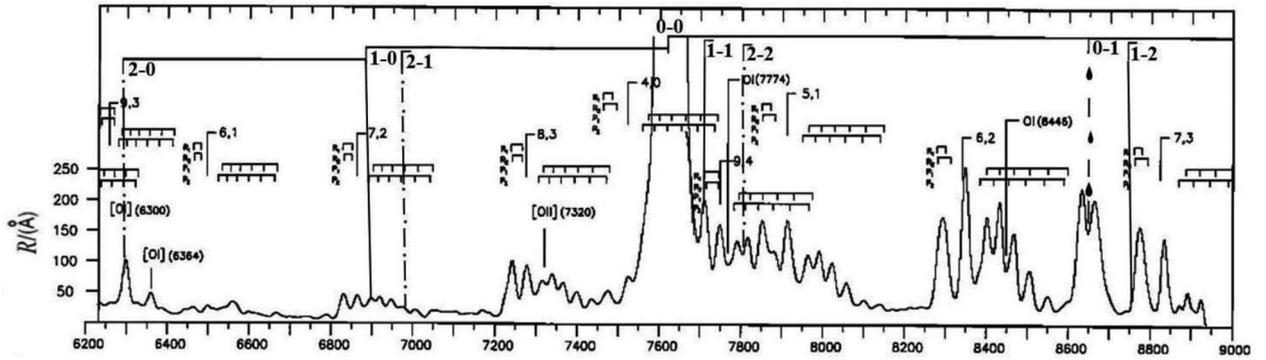
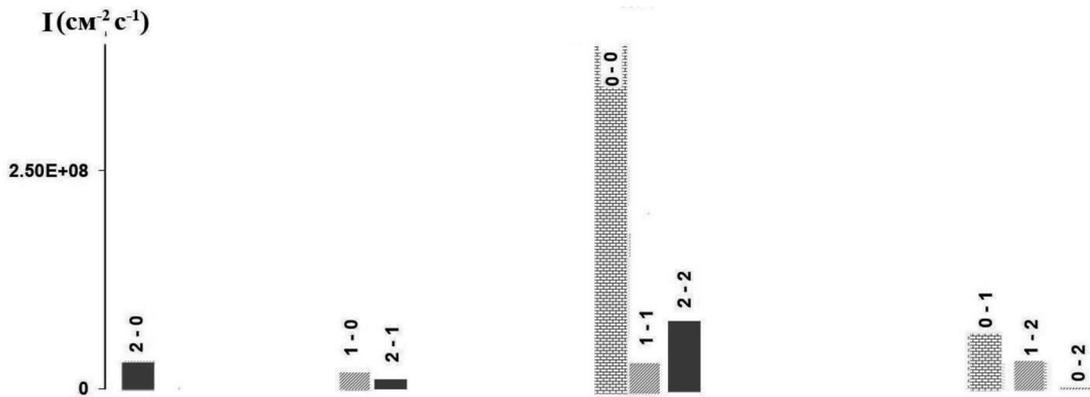


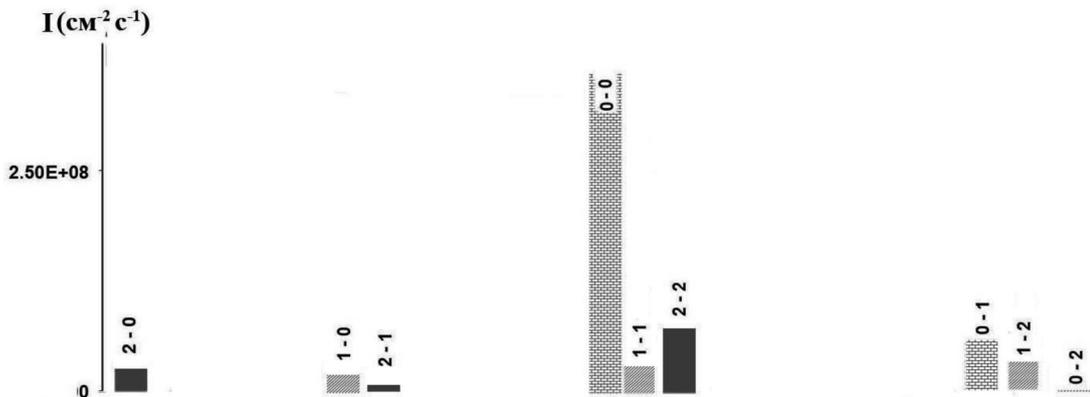
Рис. 8. Фрагмент спектра свечения в диапазоне 370–440 нм (а), гистограммы для полос Чемберлена: б — средних широт Земли; в — для экватора и северных тропиков Земли; г — для атмосферы Марса



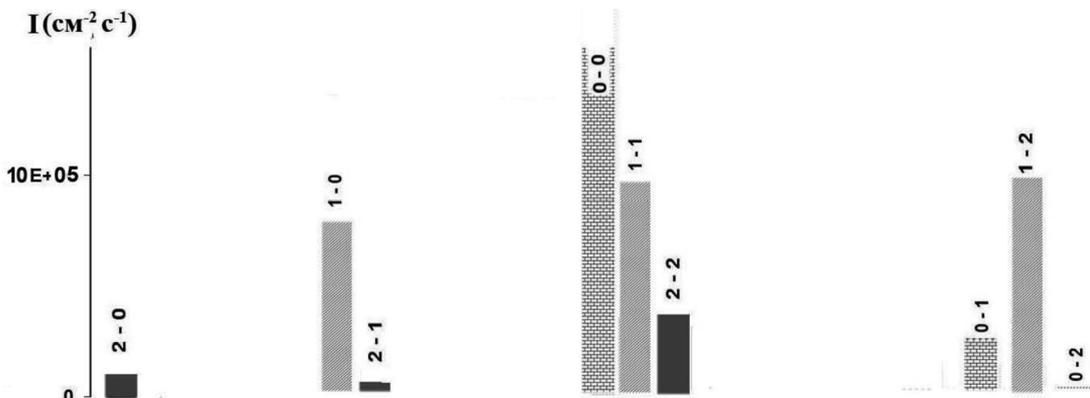
a



б



в



г

Рис. 9. Фрагмент спектра свечения в диапазоне 620–900 нм (а), гистограммы для атмосферных полос: б — средних широт Земли; в — для экватора и северных тропиков Земли; г — для атмосферы Марса

На *рис. 7* рассчитанные гистограммы для полос Герцберга I для различных условий сопоставлены с фрагментом усреднённого спектра свечения ночного неба в диапазоне 250–370 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла «Дискавери» (Broadfoot, Bellaire, 1999). Видно, что при сравнении теоретических значений интенсивности свечения для атмосферы Земли с экспериментальными данными наблюдается хорошая корреляция результатов расчёта с экспериментом. Для условий Марса происходит уменьшение интенсивности свечения полос Герцберга I по сравнению с атмосферой Земли более чем на порядок.

На *рис. 8* рассчитанные гистограммы для полос Чемберлена для различных условий сравниваются с фрагментом усреднённого спектра свечения ночного неба в диапазоне 370–440 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла «Дискавери» (Broadfoot, Bellaire, 1999). Показано, что при сопоставлении теоретических значений интенсивности свечения с экспериментальными данными для Земли наблюдается удовлетворительная корреляция результатов расчётов с экспериментом. Для условий Марса аналогично происходит уменьшение интенсивности свечения полос Чемберлена по сравнению с атмосферой Земли более чем на порядок.

На *рис. 9* рассчитанные гистограммы для атмосферных полос для различных условий сопоставлены с фрагментом усреднённого спектра свечения ночного неба в диапазоне 620–900 нм, измеренного спектрографом с космического шаттла «Индевор» (Broadfoot, Bellaire, 1999). Показано, что при сравнении теоретически рассчитанной интенсивности свечения с экспериментальными данными для Земли наблюдается удовлетворительная корреляция результатов расчётов с экспериментом, тогда как для условий Марса происходит изменение относительного вклада колебательных уровней состояния $b^1\Sigma_g^+$ в свечение атмосферных полос. Так, вклад колебательного уровня $v' = 1$ увеличивается по сравнению с атмосферой Земли.

Заключение

На основании экспериментальных данных по профилям концентрации атомарного кислорода и температуры в атмосфере Земли на средних широтах ($55,7^\circ$ с. ш.), а также в экваториальной зоне и в северных тропиках (23° с. ш.) для зимнего, весеннего, летнего и осеннего периодов проведены расчёты объёмной и интегральной интенсивности свечения полос Герцберга I в диапазоне длин волн 250–370 нм, Чемберлена в диапазоне длин волн 370–440 нм и атмосферных полос в диапазоне 700–1000 нм. Выполнено сравнение теоретических значений со спектральными измерениями спектрографами с космических шаттлов «Дискавери» (STS-53) и «Индевор» (STS-69).

Показано, что наблюдается хорошая корреляция результатов расчёта с экспериментальными данными. Так, излучательные переходы (3) с колебательных уровней $v' = 3, 4, 5, 6$ состояния $A'^3\Delta_u$ дают доминирующий вклад в свечение в диапазоне 370–440 нм. Излучательные переходы (5) с колебательных уровней $v' = 0, 1$ состояния $b^1\Sigma_g^+$ вносят главную долю в свечение в ИК-диапазоне 700–1000 нм. При этом учтены излучательные переходы с $b^1\Sigma_g^+$, $v' = 0$, что позволило идентифицировать полосы 762 и 865 нм, измеренные на борту космического шаттла «Индевор». Показано, что результаты расчётов хорошо согласуются с данными, полученными с шаттла.

Аналогичные расчёты интенсивности свечения полос в диапазоне длин волн 250–370 нм, 370–440 нм, 700–1000 нм проведены для условий экваториальной зоны Марса при $L_S \sim 180^\circ$, т. е. для осеннего равноденствия.

Литература

1. Кириллов А. С. Расчёт констант скоростей взаимодействия синглетного и триплетного колебательно-возбуждённого молекулярного кислорода // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 7. С. 653–658.

2. *Кораблёв О. И.* Спектроскопия Марса с космических аппаратов: новые методы, новые результаты // Успехи физ. наук. 2013. Т. 183. № 7. С. 762–769. DOI: 10.3367/UFNr.0183.201307h.0762.
3. *Краснопольский В. А., Крысько А. А., Рогачев В. Н., Паршев В. А.* Спектроскопия свечения ночного неба Венеры на АМС «Венера-9» и «Венера-10» // Косм. исслед. 1976. Т. 14. № 5. С. 789–795.
4. *Роч Ф., Гордон Дж.* Свечение ночного неба. М.: Мир, 1977. 152 с.
5. *Хвостиков И. А.* Свечение ночного неба. М.; Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1937. 165 с.
6. *Шефов Н. Н., Семенов А. И., Хомич В. Ю.* Излучение верхней атмосферы — индикатор её структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
7. *Barth C. A., Hord C. W., Pearce J. B. et al.* Mariner 6 and 7 ultraviolet spectrometer experiment: Upper atmosphere data // J. Geophysical Research. 1971. V. 76. No. 10. P. 2213–2227. DOI: 10.1029/JA076i010p02213.
8. *Bertaux J.-L., Leblanc F., Witasse O., Quemerais E., Liliensten J., Stern S. A., Sandel B., Korablev O.* Discovery of an aurora on Mars // Nature. 2005. V. 435. P. 790–794.
9. *Bertaux J.-L., Gondet B., Lefèvre F., Montmessin F.* First detection of O₂ 1.27 μm nightglow emission at Mars with OMEGA/MEX and comparison with general circulation model predictions // J. Geophysical Research: Planets. 2012. V. 117. No. E11. Article E00J04. DOI: 10.1029/2011JE003890.
10. *Broadfoot A. L., Bellaire P. J., Jr.* Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow // J. Geophysical Research. 1999. V. 104. No. A8. P. 17127–17138. DOI: 10.1029/1999ja900135.
11. *Fedorova A. A., Lefèvre F., Guslyakova S. et al.* The O₂ nightglow in the Martian atmosphere by SPICAM onboard of Mars-Express // Icarus. 2012. V. 219. No. 2. P. 596–608. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.03.031.
12. *Gagné M.-E., Melo S. M. L., Lefèvre F. et al.* Modeled O₂ airglow distributions in the Martian atmosphere // J. Geophysical Research: Planets. 2012. V. 117. No. E6. Article E06005. DOI: 10.1029/2011JE003901.
13. *Gérard J.-C., Soret L., Thomas I. R. et al.* Observation of the Mars O₂ visible nightglow by the NOMAD spectrometer onboard the Trace Gas Orbiter // Nature Astronomy. 2024. V. 8. P. 77–81. <https://doi.org/10.1038/s41550-023-02104-8>.
14. *González-Galindo F., Gérard J.-C., Soret L. et al.* Airglow and aurora in the Martian atmosphere: Contributions by the Mars Express and ExoMars TGO missions // Space Science Reviews. 2024. V. 220. Article 42. 32 p. <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01077-y>.
15. *Kirillov A. S.* The calculations of quenching rate coefficients of O₂(b¹Σ_g⁺, ν) in collisions with O₂, N₂, CO, CO₂ molecules // Chemical Physics. 2013. V. 410. P. 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2012.11.012>.
16. *Kirillov A. S.* The calculation of quenching rate coefficients of O₂ Herzberg states in collisions with CO₂, CO, N₂, O₂ molecules // Chemical Physics Letters. 2014. V. 592. P. 103–108. DOI: 10.1016/j.cplett.2013.12.009.
17. *Migliorini A., Piccioni G., Gerard J. C. et al.* The characteristics of the O₂ Herzberg II and Chamberlain bands observed with VIRTIS/Venus Express // Icarus. 2013. V. 223. No. 1. P. 609–614. DOI: 10.1016/j.icarus.2012.11.01.
18. *Sheese P. E., McDade I. C., Gattinger R. L., Llewellyn E. J.* 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. Geophysical Research: Atmospheres. 2011. V. 116. No. D1. Article D01303. DOI: 10.1029/2010JD014640.

Study of the proper night glow of the atmospheres of Earth and Mars in different bands of molecular oxygen using remote sensing from space

O. V. Antonenko, A. S. Kirillov

*Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk Region 184209, Russia
E-mail: antonenko@pgia.ru*

This paper presents the results of theoretical calculations of the glow of excited molecular oxygen (O₂) in the night sky of the atmospheres of the Earth and Mars. The profiles of the concentrations of atomic oxygen (O) at middle latitudes of the Earth (55.7° N), in the equatorial region and in Northern tropics

(23.5° N) are presented. The temperature profiles used in the calculations were obtained from long-term (1960–2000) measurements at altitudes of 30–110 km. For the nitrogen (N₂) and O₂ concentration profiles, data from the MSIS-90 (Mass Spectrometer–Incoherent Scatter, 1990) model were used. Also, the O altitude profiles for the Martian atmosphere are presented for the equatorial latitude; for the carbon dioxide (CO₂) concentration and temperature profiles, data were used according to the General Circulation Model (GCM) of the French Laboratory of Dynamic Meteorology (Laboratoire de Météorologie Dynamique — LMD), called LMD-MGCM. The values of the glow intensities of the Herzberg I, Chamberlain and Atmospheric bands at mid-latitudes and in the equatorial zone of the Earth, as well as for the equatorial zone of Mars, were calculated. The calculations were performed using experimental data on the concentrations of atomic oxygen for the indicated latitudes of the planets. The correlation of the results of these calculations with experimental data on the O₂ night glow on Earth obtained from the space shuttles Endeavour and Discovery, is discussed. It is shown that there is good agreement between the theoretical calculations and the experimental data for the considered latitudes of the Earth.

Keywords: molecular oxygen, glow intensity, Herzberg and Chamberlain bands, Atmospheric bands, mid-latitudes, equatorial zone, space transport system, correlation of results

Accepted: 18.11.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-359-371

References

1. Kirillov A.S., Calculation of the rate constants of interaction of singlet and triplet vibrationally excited molecular oxygen, *Kvantovaya elektronika*, 2012, Vol. 42, No. 7, pp. 653–658 (in Russian).
2. Korablev O.I., Space-based spectroscopy of Mars: new methods and new results, *Physics Uspekhi*, 2013, Vol. 56, No. 7, pp. 722–729 (in Russian), DOI: 10.3367/UFNe.0183.201307h.0762.
3. Krasnopolsky V.A., Krysko A.A., Rogachev V.N., Parshev V.A., Spectroscopy of the glow of the night sky of Venus on the AMS “Venera-9” and “Venera-10”, *Cosmic Research*, 1976, Vol. 14, No. 5, pp. 789–795 (in Russian).
4. Roch F., Gordon J., *Svechenie nochnogo neba* (Glow of the night sky), Moscow: Mir, 1977, 152 p. (in Russian).
5. Khvostikov I.A., *Svechenie nochnogo neba* (Glow of the night sky), Moscow; Leningrad: Izd. Akademii nauk SSSR, 1937, 165 p. (in Russian).
6. Shefov N.N., Semenov A.I., Khomich V.Yu., *Izlučenje verkhnei atmosfery — indikator ee struktury i dinamiki* (Airglow as an indicator of the upper atmospheric structure and dynamics), Moscow: GEOS, 2006, 741 p. (in Russian).
7. Barth C.A., Hord C.W., Pearce J.B. et al., Mariner 6 and 7 ultraviolet spectrometer experiment: Upper atmosphere data, *J. Geophysical Research*, 1971, Vol. 76, No. 10, pp. 2213–2227, DOI: 10.1029/JA076i010p02213.
8. Bertaux J.-L., Leblanc F., Witasse O., Quemerais E., Lilensten J., Stern S.A., Sandel B., Korablev O., Discovery of an aurora on Mars, *Nature*, 2005, Vol. 435, pp. 790–794.
9. Bertaux J.-L., Gondet B., Lefèvre F., Montmessin F., First detection of O₂ 1.27 μm nightglow emission at Mars with OMEGA/MEX and comparison with general circulation model predictions, *J. Geophysical Research: Planets*, 2012, Vol. 117, No. E11, Article E00J04, DOI: 10.1029/2011JE003890.
10. Broadfoot A.L., Bellaire P.J., Jr., Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow, *J. Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. A8, pp. 17127–17138, DOI: 10.1029/1999ja900135.
11. Fedorova A.A., Lefèvre F., Guslyakova S. et al., The O₂ nightglow in the Martian atmosphere by SPICAM onboard of Mars-Express, *Icarus*, 2012, Vol. 219, No. 2, pp. 596–608, DOI: 10.1016/j.icarus.2012.03.031.
12. Gagné M.-E., Melo S.M.L., Lefèvre F. et al., Modeled O₂ airglow distributions in the Martian atmosphere, *J. Geophysical Research: Planets*, 2012, Vol. 117, No. E6, Article E06005, DOI: 10.1029/2011JE003901.
13. Gérard J.-C., Soret L., Thomas I.R. et al., Observation of the Mars O₂ visible nightglow by the NOMAD spectrometer onboard the Trace Gas Orbiter, *Nature Astronomy*, 2024, Vol. 8, pp. 77–81, <https://doi.org/10.1038/s41550-023-02104-8>.
14. González-Galindo F., Gérard J.-C., Soret L. et al., Airglow and aurora in the Martian atmosphere: Contributions by the Mars Express and ExoMars TGO missions, *Space Science Reviews*, 2024, Vol. 220, Article 42, 32 p., <https://doi.org/10.1007/s11214-024-01077-y>.

15. Kirillov A. S., The calculations of quenching rate coefficients of $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu)$ in collisions with O_2 , N_2 , CO , CO_2 molecules, *Chemical Physics*, 2013, Vol. 410, pp. 103–108, <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2012.11.012>.
16. Kirillov A. S., The calculation of quenching rate coefficients of O_2 Herzberg states in collisions with CO_2 , CO , N_2 , O_2 molecules, *Chemical Physics Letters*, 2014, Vol. 592, pp. 103–108, DOI: 10.1016/j.cplett.2013.12.009.
17. 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, Vol. 223, No. 1, pp. 609–614, DOI: 10.1016/j.icarus.2012.11.01.
18. Sheese P. E., McDade I. C., Gattinger R. L., Llewellyn E. J., Atomic oxygen densities retrieved from optical spectrograph and infrared imaging system observations of O_2 A-band airglow emission in the mesosphere and lower thermosphere, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, Vol. 116, Article D01303, DOI: 10.1029/2010JD014640.