

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.040

ВОЗБУЖДЕНИЕ СИНГЛЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА НА ВЫСОТАХ МЕЗОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В НОЧНЫЕ И СУМЕРЕЧНЫЕ ЧАСЫ

Ю.Н. Куликов, А.С. Кириллов

Полярный геофизический институт, Апатиты, Мурманская область

Абстракт

Выполнены расчёты скоростей возбуждения и столкновительных процессов деактивации состояний $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu)$ и $O_2(a^1\Delta_g, \nu)$ молекулярного кислорода в высокоширотной мезосфере и нижней термосфере Земли в сумеречные и ночные часы в период равноденствия. Для расчётов высотных профилей концентрации атомарного и невозбуждённого молекулярного кислорода $O_2(X^3\Sigma_g^-)$, а также других химически активных составляющих (O_3 , OH и др.), необходимых для расчётов уровней населённости возбуждённых синглетных состояний O_2^* в области мезосферы и нижней термосферы, применялась разработанная ранее аэрономическая модель суточных вариаций химического состава верхней атмосферы. Модель включает в себя детальные расчёты скоростей фотодиссоциации компонентов атмосферы солнечным УФ-излучением с учётом их суточных вариаций, зависимости от солнечной активности, зенитного угла и географической широты, а также турбулентного и диффузионного массопереноса. Для проверки построенной модели использованы опубликованные экспериментальные данные о высотном распределении оптических и ИК-эмиссий верхней атмосферы, а также ряда других измерений. Сравнение рассчитанных населённостей $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu)$ на высотах 80-110 км с результатами экспериментальных оценок для ночной Атмосферной эмиссии O_2 даёт хорошее согласие. Также сравнение результатов расчётов сумеречной Атмосферной ИК-эмиссии в полосе $O_2(a^1\Delta_g)$ с данными измерений показывает хорошее согласие модели и экспериментальных данных при определённом выборе входных параметров модели.

Введение

Свечение полос Атмосферной (Atm) и Инфракрасной Атмосферной (IR-Atm) систем молекулярного кислорода в спектре верхней и средней атмосферы в ночные и сумеречные часы происходит в результате спонтанных излучательных переходов с электронно-возбуждённых состояний $b^1\Sigma_g^+$ и $a^1\Delta_g$ молекулы O_2 на основное состояние $X^3\Sigma_g^-$ (рис.1):



Наиболее интенсивной из Атмосферной системы является полоса 762 нм, обусловленная переходом (1) с $\nu=0 \rightarrow \nu'=0$. У Инфракрасной Атмосферной системы, аналогично, наиболее интенсивной является полоса 1.27 мкм, которая связана с переходом (2) $\nu=0 \rightarrow \nu'=0$.

Исследованию высотных профилей свечения указанных эмиссий и механизмов образования электронно-возбуждённого синглетного молекулярного кислорода в спокойной и авроральной ионосфере посвящено большое число экспериментальных и теоретических работ (Cartwright et al., 1972; Gattinger and Vallance Jones, 1973; Deans et al., 1976; Feldman, 1978; McDade et al., 1985; Gattinger et al., 1996; Llewellyn et al., 1999; Jones et al., 2006; Kirillov, 2014; Slanger et al., 2017; Kirillov and Belakhovsky, 2021; Куликов, 2021).

Излучения Инфракрасных Атмосферных и Атмосферных молекулярных полос O_2^* являются важными компонентами дневного свечения мезосферы и нижней термосферы Земли. В работах (Mlynczak et al., 1993, 2001, 2007; Yankovsky et al., 2016, 2019) представлены радиационные и кинетические модели для расчета дневных концентраций синглетного молекулярного кислорода на высотах мезосферы и нижней термосферы. Авторы указанных работ продемонстрировали, что на более низких высотах синглетный кислород $O_2(a^1\Delta_g)$ образуется преимущественно за счет фотолиза озона в полосе Хартли. Используя экспериментальные данные измерений дневного свечения синглетного кислорода, они получили значения концентраций озона и атомарного кислорода в мезосфере и нижней термосфере.

Авторы работы (Slanger et al., 2017) в результате серии многолетних лабораторных исследований получили сильно различающиеся скорости гашения в неупругих столкновениях для двух самых низких колебательных уровней $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu'=0, 1)$. Их анализ данных наблюдений с борта КА Space Shuttle подтвердил, что в результате передачи энергии в реакции $O(^1D) + O_2$ доминирующим продуктом является состояние $b(1)$, а не $b(0)$. При этом в состоянии $b(1)$ образуется около 80% конечного продукта. Кроме того, только состояние $b(1)$

эффективно гасится в столкновениях с атмосферными составляющими и результатом столкновений, как с $O(^3P)$, так и с O_2 , является состояние $b(0)$. В термосфере отношение концентраций $[O(^3P)]/[O_2]$ быстро возрастает с высотой и доля гашения $b(1)$ благодаря $O(^3P)$ также возрастает.

Ввиду этого, мониторинг из космоса дневных эмиссий Атмосферных полос (1-1) и (0-0) состояния $O_2(b^1-X)$ авторы работы (Slanger et al., 2017) предложили использовать, как метод дистанционного зондирования концентраций $[O]$ и $[O_2]$ кислорода и температуры термосферы на высотах наблюдения.

Целью настоящей работы является дальнейшее исследование физико-химических процессов формирования высотных распределений возбуждённых состояний $a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$ молекулярного кислорода (синглетного кислорода) с использованием аэрономической модели состава верхней атмосферы и совершенствование модели расчёта интенсивности ночных и сумеречных атмосферных эмиссий в мезосфере и нижней термосфере Земли. Особое внимание уделяется расчёту констант скоростей взаимодействия синглетного кислорода с атмосферными составляющими.

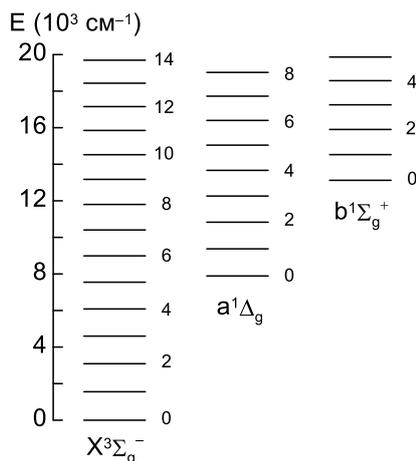


Рисунок 1. Схема колебательных уровней $X^3\Sigma_g^-$, $a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$ состояний молекулы кислорода.

Константы взаимодействия $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu)$ и $O_2(a^1\Delta_g, \nu)$ с молекулами O_2 и N_2

Расчёты констант взаимодействия синглетного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu > 0)$ и $O_2(a^1\Delta_g, \nu > 0)$ с молекулами O_2 был проведен в работах (Kirillov, 2012, 2013). Схема колебательных уровней $X^3\Sigma_g^-$, $a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$ состояний молекулы кислорода представлена на рис.1. В данных работах было показано, что доминирующим каналом гашения является перенос энергии электронного возбуждения на молекулу-мишень с сохранением энергии колебаний у изначально возбужденной молекулы:

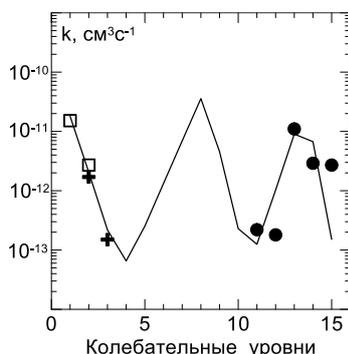
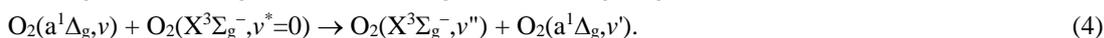
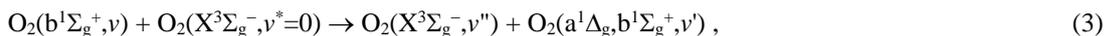


Рисунок 2. Рассчитанные константы (сплошные линии) для $\nu=1-15$ процесса (3) сравниваются с экспериментальными данными (Bloemick et al., 1998) (квадраты), (Kalogerakis et al., 2002) (крестики), (Slanger and Copeland, 2003) (круги).

На рис.2 и рис.3 приведены результаты расчетов в работах (Kirillov, 2012, 2013) для уровней $\nu=1-15$ состояния $b^1\Sigma_g^+$ и $\nu=1-20$ состояния $a^1\Delta_g$. Проведено сравнение с результатами имеющихся экспериментальных изменений и получено хорошее согласие. Для столкновений $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu=0-15)$ с молекулами азота N_2 расчеты

проведены в (Kirillov, 2013), давшие хорошее согласие с экспериментальными данными для $v=0$ $k=2 \times 10^{-15}$ $\text{см}^3\text{с}^{-1}$. Для столкновений $\text{O}_2(a^1\Delta_g, v) + \text{N}_2$ используем данные, имеющиеся в научной литературе.

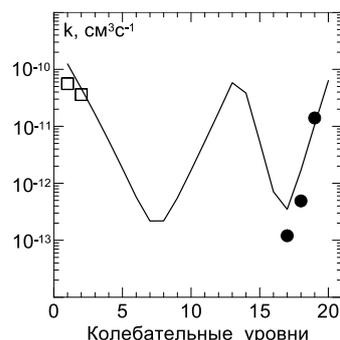


Рисунок 3. Рассчитанные константы (сплошные линии) для $v=1-20$ процесса (4) сравниваются с экспериментальными данными (Hwang et al., 1998) (квадраты), (Slanger and Copeland, 2003) (круги).

Расчёт относительных населённостей $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+, v)$ на высотах 80-110 км

На основании приведённых на рис.2 констант взаимодействия рассчитаны относительные населённости $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+, v=1-15)$ на высотах 80-110 км с учётом гашения электронного возбуждения при спонтанных излучательных процессах и неупругих столкновениях с составляющими O_2 , N_2 , O . При этом для констант взаимодействия с молекулами азота использовались результаты работы (Kirillov, 2013), для константы взаимодействия с атомарным кислородом использовалось значение $k_0=8 \times 10^{-14}$ $\text{см}^3\text{с}^{-1}$ – согласно (Шефов и др., 2006).

Проведено сравнение рассчитанных населённостей с результатами экспериментальных оценок (Slanger et al., 2000) для $v=1-15$, выполненных с помощью телескопа Keck I (рис.4). Сравнение результатов расчётов наглядно демонстрирует, что бимодальное поведение измеренных интенсивностей свечения полос Атмосферной системы, полученное в (Slanger et al., 2000), объясняется особенностями гашения состояний $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+, v=1-15)$ невозбуждёнными молекулами кислорода.

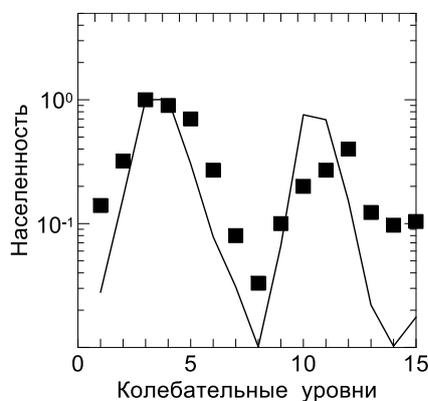


Рисунок 4. Сравнение рассчитанных населённостей $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+, v=1-15)$ с результатами экспериментальных оценок (Slanger et al., 2000).

Результаты расчётов сумеречной эмиссии в полосе 1.27 мкм O_2

В работе (Куликов, 2021) построена аэрономическая модель суточных вариаций химического состава верхней атмосферы Земли, основанная на численном решении системы нестационарных, пространственно-одномерных уравнений неразрывности для высотных распределений концентраций O , O_3 , H , OH , и HO_2 , а также возбуждённых составляющих $\text{O}(^1\text{D})$ и $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$, дополненных уравнениями молекулярной и турбулентной диффузии компонентов. В модели учтена фотодиссоциация солнечным излучением молекулярных компонентов O_2 , O_3 , H_2O и HO_2 с образованием электронно-возбуждённых продуктов $\text{O}(^1\text{D})$ и $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ и учтены последующие химические реакции между продуктами фотолиза.

В расчётах скоростей фотопроцессов использованы измерения потоков солнечной УФ-радиации из (Mount and Rottman, 1983) и сечения фотодиссоциации O_2 и O_3 из (Nicolet and Kennes, 1988), а также константы скоростей химических реакций и вертикальное распределение коэффициента турбулентной диффузии в области турбопаузы в (Garcia and Solomon, 1985; Гордиец и Куликов, 1981, 1982; Kulikov, 1996). С помощью

этой модели выполнены расчёты сумеречной вариации зенитной интенсивности эмиссии в полосе 1.27 мкм O_2 для условий ракетного эксперимента (Llewellyn and Witt, 1977) по измерению яркости этой эмиссии, проведённого 13.03 1975 г. на заходе Солнца в северной Скандинавии (Кируна, Швеция, 68°N). Солнечный зенитный угол χ во время измерений составлял 94.1°. Расчёты показали, что в дневное время возбуждение $O_2(^1\Delta_g)$ происходит в основном за счёт поглощения солнечного излучения в континууме Hartley O_3 . На закате Солнца при увеличении χ свыше 90° происходит быстрый рост высоты сумеречной тени и, соответственно, быстрое снижение на порядки величины скорости фотодиссоциации озона в континууме Hartley. Вследствие этого концентрация возбуждённых молекул синглетного кислорода в надвигающейся ночной области мезосферы начинает быстро убывать.

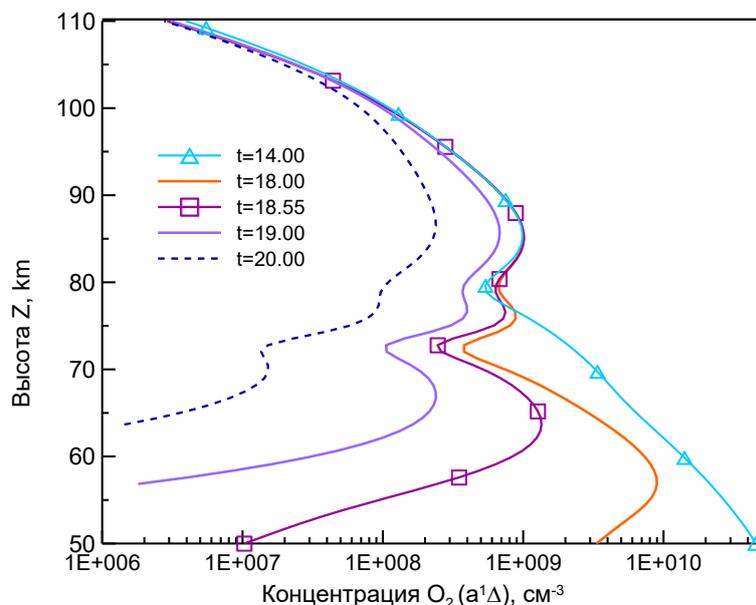


Рисунок 5. Рассчитанные высотные профили концентрации $O_2(a^1\Delta_g)$ в период до и после захода Солнца для условий эксперимента (Llewellyn and Witt, 1977).

На рис.5 приведены высотные профили концентрации $O_2(^1\Delta_g)$ в период захода Солнца, рассчитанные для условий эксперимента (Llewellyn and Witt, 1977) при значениях времени $t=18:00, 18:33, 19:00$ и $20:00$ ч. LST, для которых солнечный зенитный угол составлял $90^\circ, 94.1^\circ, 97.4^\circ$ и 104.5° , соответственно.

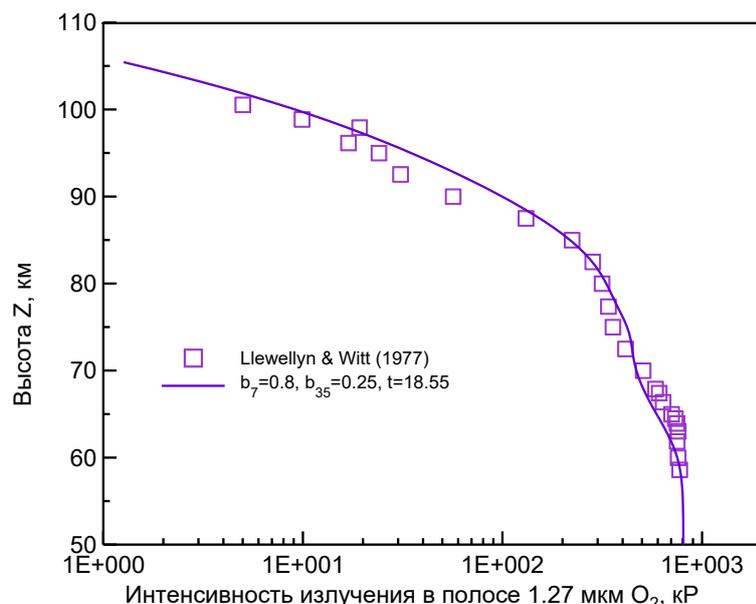


Рисунок 6. Сравнение модельной и измеренной в эксперименте (Llewellyn and Witt, 1977) интенсивности сумеречной эмиссии в полосе 1.27 мкм $O_2(a^1\Delta_g)$.

Видно, что наиболее быстрое снижение концентрации $O_2(a^1\Delta_g)$ происходит в нижней части рассматриваемого диапазона высот. Имевший место при $\chi=90^\circ$ основной максимум концентрации $O_2(^1\Delta_g)$ на уровне 56 км, через 1 час после начала заката Солнца, т.е. в 19:00, поднимается до высоты 67 км и становится меньше по величине вторичного максимума концентрации молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ на высоте около 85 км. Ещё через 1 час, т.е. в 20:00, нижний максимум концентрации $O_2(a^1\Delta_g)$ практически полностью исчезает и свечение в полосе 1.27 мкм формируется главным образом на высотах 80-97 км.

Высотный профиль зенитной интенсивности эмиссии O_2 , рассчитанный для условий измерений с борта самолёта (*Llewellyn and Witt, 1977*) в вечерних сумерках при значении солнечного зенитного угла, $\chi=94.1^\circ$ на широте $68^\circ N$ в период весеннего равноденствия, представлен на рис.6. Расчёт выполнен для квантового выхода (эффективности образования) молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ в реакции $O_3 + h\nu \rightarrow O_2(a^1\Delta_g) + O(^1D)$, составляющего 80%. Видно, что в этом случае в целом имеется удовлетворительное согласие между теорией и экспериментом. Данный результат вместе с тем указывает, что оценки эффективности основных процессов возбуждения молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ в верхней атмосфере, полученные ранее из анализа результатов отдельных сумеречных и ночных измерений (*McDade et al., 1987; Lopez-Moreno et al., 1988; Lopez-Gonzalez et al., 1989*), существенно различаются между собой и нуждаются в критическом пересмотре с использованием всех опубликованных результатов измерения и расчётов интенсивности этой эмиссии.

Заключение

1. На основе ранее разработанной аэрономической модели химического состава, с учётом неравновесных химических реакций, а также процессов турбулентного и диффузионного массопереноса нейтральных компонентов в области мезосферы и нижней термосферы Земли (50-120 км), построена теоретическая модель процессов возбуждения и столкновительного гашения Атмосферной (762 нм) и ИК-атмосферной (1.27 мкм) эмиссий в колебательно-вращательных полосах синглетного молекулярного кислорода $O_2(b^1, \nu)$ и $O_2(a^1, \nu)$. Модель включает в себя детальные расчёты скоростей фотодиссоциации компонентов атмосферы солнечным УФ-излучением с учётом их суточных вариаций, зависимости от солнечной активности, зенитного угла и географической широты.

2. Для верификации построенной модели атмосферных эмиссий молекулярного синглетного кислорода использованы опубликованные экспериментальные данные о высотном распределении оптических и ИК-эмиссий верхней атмосферы, а также ряда других измерений. Сравнение результатов расчётов интенсивности сумеречной ИК-эмиссии $O_2(a^1\Delta_g)$ с данными измерений показывает хорошее согласие модели и экспериментальных данных.

3. Представлены теоретически рассчитанные коэффициенты гашения возбуждённых состояний O_2^* . Результаты расчётов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Данные константы использованы для определения колебательных населённостей электронно-возбуждённых уровней синглетного молекулярного кислорода в ночной и сумеречной атмосфере.

4. Выполнены расчёты относительных населённостей $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu)$ на высотах 80-110 км. Сравнение рассчитанных населённостей с результатами имеющихся в научной литературе экспериментальных оценок, выполненных с помощью телескопа Кеск I, для ночной атмосферной эмиссии O_2 даёт хорошее согласие.

Литература

- Гордиец Б.Ф., Куликов Ю.Н. Влияние турбулентности и ИК-излучения на тепловой режим термосферы Земли. // Космич. исслед., 1981, т. 19, № 3, с. 539.
- Гордиец Б.Ф., Куликов Ю.Н. О роли турбулентности и инфракрасного излучения в тепловом балансе нижней термосферы. // В сб. «Инфракрасная спектроскопия и свойства среды в космосе» под ред. проф. М.М. Сущинского. // Труды ФИАН СССР им. П.Н. Лебедева, 1982, т. 130, с. 29, М., Изд. «Наука».
- Куликов Ю.Н. Исследования процессов возбуждения и релаксации электронно-возбуждённых состояний молекулярного кислорода в атмосферах Земли, Венеры и Марса на высотах свечения ночного неба. // Отчёт о НИР по гранту Мин. Науки РФ, 2021.
- Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 740 с., 2006.
- Bloemink H.I., Copeland R.A., Slinger T.G. Collisional removal of $O_2(b^1\Sigma_g^+, \nu=1,2)$ by O_2 , N_2 , and CO_2 . // J. Chem. Phys., v. 109, No. 11, p. 4237-4245, 1998.
- Cartwright D.C., Trajmar S., Williams W. The excitation of O_2 in auroras. // Ann. Geophys., v. 28, p. 397-401, 1972.
- Deans A.J., Shepherd G.G., Evans W.F.J. A rocket measurement of the $O_2(b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-)$ (0-0) atmospheric band in aurora. // J. Geophys. Res., v. 81, p. 6227-6232, 1976.
- Feldman P.D. Auroral excitation of optical emissions of atomic and molecular oxygen. // J. Geophys. Res., v. 83, p. 2511-2516, 1978.
- Garcia R, Solomon S. The effect of breaking gravity waves on the dynamics and chemical composition of the mesosphere and lower thermosphere. // J. Geophys. Res., v. 90, p. 3850-3868, 1985.

- Gattinger R.L., Vallance Jones A. Observation and interpretation of O₂ 1.27-μ emission enhancements in aurora. // *J. Geophys. Res.*, v. 78, p. 8305-8313, 1973.
- Gattinger R.L., Llewellyn E.J., Vallance Jones A. On I(5577 Å) and I(7620 Å) auroral emissions and atomic oxygen densities. // *Ann. Geophys.*, v. 14, p. 687-698, 1996.
- Hwang E.S., Copeland R.A., Robertson R.M., Slanger T.G. // *EOS Trans. AGU*, v. 79, F85, 1998.
- Jones D.B., Campbell L., Bottema M.J., Teubner P.J.O., Cartwright D.C., Newell W.R., Brunger M.J. Electron-driven excitation of O₂ under night-time auroral conditions: Excited state densities and band emissions. // *Planet. Space Sci.*, v. 54, p. 45-59, 2006.
- Kalogerakis K.S., Copeland R.A., Slanger T.G. Collisional removal of O₂(b¹Σ_g⁺, v=2,3). // *J. Chem. Phys.*, v. 116, No. 12, p. 4877-4885, 2002.
- Kirillov A.S. Calculation of rate coefficients for the interaction of singlet and triplet vibrationally excited oxygen. // *Quantum Electronics*, v. 42, No. 7, p. 653-658, 2012.
- Kirillov A.S. The calculations of quenching rate coefficients of O₂(b¹Σ_g⁺, v) in collisions with O₂, N₂, CO, CO₂ molecules. // *Chem. Phys.*, v. 410, p. 103-108, 2013.
- Kirillov A.S. Singlet oxygen O₂(b¹Σ_g⁺) production at altitudes of the polar ionosphere. // *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 54, No. 4, p. 523-529, 2014.
- Kirillov A.S., Belakhovsky V.B. The kinetics of O₂ singlet electronic states in the upper and middle atmosphere during energetic electron precipitation. // *J. Geophys. Res.: Atmosphere*, v. 105, e2020JD033177, 2021.
- Kulikov Y.N. Estimates of the vertical eddy diffusivity inferred from rocket-borne measurements of the 9.6 mm band radiation of ozone in the polar night time upper atmosphere. // *23d European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods*, Kiev, Abstracts, p. 68, 1996.
- Llewellyn E.J., Witt G. The measurement of ozone concentrations at high latitude during the twilight. // *Planet. Space Sci.*, v. 25, p. 165-172, 1977.
- Llewellyn E.J., Gattinger R.L., Vallance Jones A. On the variability of I(7620 Å)/ I(5577 Å) in low altitude aurora. // *Ann. Geophys.*, v. 17, p. 913-918, 1999.
- Lopez-Gonzalez M.J., Lopez-Moreno J.J., Lopez-Valverde M.A., Rodrigo R. Behavior of the O₂ infrared atmospheric (0-0) band in the middle atmosphere during evening twilight and at night. // *Planet. Space Sci.*, v. 37, No. 1, p. 61-72, 1989.
- Lopez-Moreno J.J., Rodrigo R., Moreno F., Lopez-Puertaz M., Molina A. Rocket measurements of O₂ Infrared Atmospheric System in the nightglow. // *Planet. Space Sci.*, v. 36, No. 5, p. 459-467, 1988.
- McDade I.C., Llewellyn E.J., Harris F.R. A rocket measurement of the O₂(b¹Σ_g⁺-X³Σ_g⁻) (0-0) atmospheric band in a pulsating aurora. // *Can. J. Phys.*, v. 63, p. 1322-1329, 1985.
- McDade I.C., Llewellyn E.J., Greer R.G., Murtagh D.P. ETON 6: A rocket measurement of the O₂ infrared atmospheric (0-0) band in the nightglow. // *Planet. Space Sci.*, v. 35, p. 1541, 1987.
- Mlynczak M.G., Solomon S., Zaras D.S. An updated model for O₂(a¹Δ_g) concentrations in the mesosphere and lower thermosphere and implications for remote sensing of ozone at 1.27 μm. // *J. Geophys. Res.: Atmosphere*, v. 98, p. 18639-18648, 1993.
- Mlynczak M.G., Morgan F., Yee J.-H., Espy P., Murtagh D., Marshall B., Schmidlin F. Simultaneous measurements of the O₂(¹Δ) and O₂(¹Σ) airglows and ozone in the daytime mesosphere. // *Geophys. Res. Lett.*, v. 28, p. 999-1002, 2001.
- Mlynczak M.G., Marshall B.T., Martin-Torres F.J., Russell J.M. III, Thompson R.E., Remsberg E.E., Gordley L.L. Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry observations of daytime mesospheric O₂(¹Δ) 1.27 μm emission and derivation of ozone, atomic oxygen, and solar and chemical energy deposition rates. // *J. Geophys. Res.: Atmosphere*, v. 112, D15306, 2007.
- Mount G.H., Rottman G.J. The solar absolute spectral irradiance 1150-3173 Å: May 17, 1982. // *J. Geophys. Res.*, v. 88, No. C9, p. 5403-5410, 1983.
- Nicolet M., Kennes R. Aeronomical problems of molecular oxygen photodissociation-IV. The various parameters for the Herzberg continuum. // *Planet. Space Sci.*, v. 36, No. 10, p. 1069-1076, 1988.
- Slanger T.G., Cosby P.C., Huestis D.L., Osterbrock D.E. Vibrational level distribution of O₂(b¹Σ_g⁺, v=0-15) in the mesosphere and lower thermosphere region. // *J. Geophys. Res.*, v. 105, No. D16, p. 20557-20564, 2000.
- Slanger T.G., Copeland R.A. Energetic oxygen in the upper atmosphere and the laboratory. // *Chem. Rev.*, v. 103, No. 12, p. 4731-4765, 2003.
- Slanger T.G., Pejakovic D.A., Kostko O., Matsiev D., Kalogerakis K.S. Atmospheric dayglow diagnostics involving the O₂(b-X) Atmospheric band emission: Global Oxygen and Temperature (GOAT) mapping. // *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, v. 122, p. 3640-3649, 2017.
- Yankovsky V.A., Martyshenko K.V., Manuilova R.O., Feofilov A.G. Oxygen dayglow emissions as proxies for atomic oxygen and ozone in the mesosphere and lower thermosphere. // *J. Molec. Spec.*, v. 327, p. 209-231, 2016.
- Yankovsky V., Vorobeva E., Manuilova R. New techniques for retrieving the [O(³P)], [O₃] and [CO₂] altitude profiles from dayglow oxygen emissions: Uncertainty analysis by the Monte Carlo method. // *Adv. Space Res.*, v. 64, p. 1948-1967, 2019.