УДК 535

О.В. Антоненко, А.С. Кириллов, Ю.Н. Куликов

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

ЭЛЕКТРОННО-ВОЗБУЖДЕННЫЕ КИСЛОРОДНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ

Рассмотрены процессы возбуждения и гашения электронно-возбужденных состояний Герцберга молекулярного кислорода в атмосферах планет земной группы на высотах свечения ночного неба. Обсуждаются принципиальные различия кинетики электронно-возбужденных состояний O_2 в ночных атмосферах Земли и Венеры. Проведен расчет колебательных населенностей состояний $c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$ на высотах свечения ночного неба планет земной группы. Наблюдается хорошая корреляция результатов расчета с результатами наземных наблюдений и спектральными данными, полученными с борта космических летательных аппаратов.

Ключевые слова: молекулярный кислород, электронно-возбужденные состояния, высоты свечения ночного неба, планеты земной группы, тройные столкновения, константы гашения.

O.V. Antonenko, A.S. Kirillov, Yu.N. Kulikov

Polar Geophysical Institute, Apatity, Russian Federation

ELECTRONICALLY EXCITED OXYGEN COMPONENTS IN THE ATMOSPHERES OF PLANETS OF TERRESTRIAL GROUP

The excitation and quenching processes of electronically excited Herzberg states of molecular oxygen are considered at the altitudes of the nightglow in the atmospheres of planets of terrestrial group. Principal difference in the electronic kinetics of O_2 states in the night atmospheres of Earth and Venus is discussed. Vibrational populations of the $c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$ states at the altitudes of the nightglow of planets of terrestrial group are calculated. Good agreement of the results of the calculation with results of ground observations and with spectral data received from spacecrafts is shown.

Keywords: molecular oxygen, electronically excited states, altitudes of the nightglow, planets of terrestrial group, three-body collisions, quenching rate constants.

Введение

Молекулярный кислород O_2 – это второй по содержанию (после молекулярного азота N_2) из основных газов в атмосфере Земли. В верхней атмосфере Земли эффективно протекает процесс диссоциации молекул O_2 солнечным ультрафиолетовым излучением

что приводит к образованию относительно высоких концентраций атомарного кислорода О на высотах более 80 км, с максимумом около 95–100 км. Кроме того, при тройных столкновениях

с участием атома и молекулы кислорода (где М – третья частица при столкновении) образуется озон О₃, который на высотах стратосферы Земли находится в достаточном количестве, чтобы защитить живые организмы от пагубного воздействия ультрафиолетового излучения Солнца – УФ-Б (280–315 нм). В результате протекания процессов (1) и (2) в атмосферах планет земной группы кислород имеет три устойчивые формы: О, О₂ и О₃.

Индикатором наличия кислорода в атмосферах планет является свечение различных полос (у молекулы О₂) и линий (у атома О). На рис. 1 приведена схема пяти электронно-возбужденных $a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$, $c^1\Sigma_u^-$, $A'^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$ и основного $X^3\Sigma_g^-$ состояний молекулы О₂, а также указаны названия систем полос, излучаемых при спонтанных переходах между различными состояниями. Все приведенные состояния находятся ниже энергии диссоциации молекулы О₂ $\approx 41\,300\text{ см}^{-1}$ ($8065\text{ см}^{-1} = 1\text{ эВ}$). Аналогичная схема электронно-возбужденных и основного 3P состояний атома кислорода приведена на рис. 2 [1].

Рис. 1. Электронные переходы внутри молекулы О₂

Рис. 2. Электронные переходы внутри атома О

При вторжении в верхнюю атмосферу Земли авроральных частиц (солнечных электронов и протонов) на высоких широтах наблюдается свечение полярных сияний. При этом одними из наиболее ярких эмиссий в спектрах полярных сияний являются зеленая и красная линии (558 и 630 нм соответственно) атомарного кислорода, обусловленные излучением фотонов при спонтанных переходах $^1S \rightarrow ^1D$ и $^1D \rightarrow ^3P$ [2] (см. рис. 2). Что касается молекулярного кислорода, то одними из наиболее интенсивных в спектрах сияний оказываются полосы атмосферной системы (переход $b^1\Sigma_g^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-$) [2, 3] (см. рис. 1). Однако в данной области спектра доминируют полосы первой положительной системы молекулярного азота (переход $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$ у молекулы N_2), и информацию об интенсивностях свечения атмосферных полос можно получить, используя только синтетические спектры.

Наиболее четко свечение молекулярного кислорода прослеживается в спектрах свечения ночного неба Земли [4, 5]. Еще в начале 60-х годов прошлого века сотрудниками ИФА РАН (Института физики

атмосферы Российской академии наук) В.И. Красовским и Н.Н. Шефовым были опубликованы спектры, где четко было показано присутствие полос Герцберга I (переход $A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^3\Sigma_g^-$) в диапазоне 300–450 нм. Дальнейшие измерения спектров ночного неба американскими исследователями [6] также указали на интенсивное свечение полос Чемберлена (переход $A'^3\Delta_u \rightarrow a^1\Delta_g$) (рис. 3).

Рис. 3. Спектр свечения ночного неба Земли в диапазоне 240–440 нм (2400–4400 Å) согласно работе [6]

Кинетика электронно-возбужденного кислорода представляет интерес в вопросах свечения, химических процессов, теплового баланса в условиях лабораторного разряда и в условиях разрядов между грозовыми облаками и ионосферой (так называемых спрайтов) [7, 8]. Во время таких разрядов молекулярный кислород часть энергии ускоренных электронов аккумулирует в виде энергии электронного возбуждения. Поскольку переходы между всеми состояниями, приведенными на рис. 1, дипольно-запрещенные, то характерные излучательные времена жизни этих возбужденных состояний варьируются от $\approx 0,1$ до $\approx 4 \cdot 10^3$ с. В связи с этим даже при давлениях значительно ниже нормального атмосферного столкновительные времена жизни этих состояний намного меньше излучательных и кинетика электронного возбуждения определяется исключительно столкновительными процессами.

Известно также, что синглетный молекулярный кислород $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ является важным компонентом активной среды

кислородно-йодного лазера (КИЛ). Передача энергии возбуждения молекулы кислорода основному состоянию атома йода $I(^2P_{3/2})$ при неупругих столкновениях обеспечивает эффективную накачку верхнего лазерного уровня атома йода $I(^2P_{1/2})$. Спонтанный переход с верхнего уровня на основной приводит к излучению фотона с длиной волны $\lambda = 1,315$ нм. Источниками синглетного кислорода, поступающего в активную среду КИЛ, могут быть химический генератор, где происходит реакция хлора с щелочным раствором перекиси водорода [9], низкотемпературная плазма высокочастотного разряда в кислородной среде [10, 11], световой котел, содержащий молекулярный кислород и излучение с длиной волны ≈ 762 нм [12].

Таким образом, изучение кинетики электронно-возбужденного кислорода в смесях с другими газами проводится в различных областях фундаментальных исследований, включающих космические исследования, активные среды лазеров, среды лабораторных разрядов и т.п. Цель настоящей работы – представить результаты экспериментальных и теоретических исследований свечения молекулярного кислорода O_2 в атмосферах планет земной группы.

1. Свечение планет ночного неба земной группы

На рис. 4 приведены профили концентраций составляющих N_2 , CO_2 , O_2 , O_3 , O для высот средних атмосфер Венеры, Марса, Земли согласно работам [13–15]. Как видно из приведенного рисунка, в отличие от Земли, где в атмосфере основными газами являются N_2 , O_2 , O , в атмосферах планет Венеры и Марса доминирующим газом является углекислый газ CO_2 , поэтому при исследовании кинетических процессов, связанных со свечением электронно-возбужденных молекул в атмосферах Земли, Венеры или Марса, следует ожидать различные скорости гашения и образования возбужденных молекул основными атмосферными составляющими.

В 1975 году автоматические межпланетные станции «Венера-9» и «Венера-10» впервые в истории планетарных исследований позволили получить спектры ночного свечения атмосферы Венеры непосредственно с орбиты планеты (<http://znaniya-sila.narod.ru>). В 1976 году ведущий сотрудник Института космических исследований Российской академии наук В.А. Краснопольский совместно с группой советских ученых впервые опубликовал ночной спектр свечения атмосферы Ве-

неры в интервале 400–700 нм на высотах около 100 км над поверхностью планеты. Спектр был получен с орбитальных станций «Венера-9» и «Венера-10» [16]. Это были первые спектрометрические результаты для свечения атмосферы на ночной стороне планеты, где доминирующей составляющей является углекислый газ CO_2 .

Рис. 4. Профили концентраций составляющих N_2 , CO_2 , O_2 , O_3 , O для высот средних атмосфер Венеры, Марса, Земли согласно работам [13–15]

Чуть позднее в лабораторных экспериментах американских ученых [17, 18] было показано, что спектр свечения ночного неба Венеры и прогрессия полос $0-v'$ системы Герцберга II ($c^1\Sigma_u^-, v = 0 \rightarrow X^3\Sigma_g^-, v' = 3-13$) молекулярного кислорода, излучаемая в смеси O_2 –He– CO_2 в диапазоне длин волн 350–700 нм в условиях лабораторного разряда, идентичны (рис. 5). Кроме того, американский исследователь Слэнджер [19] указал, что в спектрах свечения атмосферы Венеры, опубликованных В.А. Краснопольским с соавторами [16], присутствует также незначительный вклад от полос Чемберлена ($A'^3\Delta_u, v = 0 \rightarrow a^1\Delta_g, v' = 4-8$), обусловленных спонтанными переходами с нулевого колебательного уровня состояния $A'^3\Delta_u$ возбужденной молекулы O_2 .

В дальнейшем спектральные измерения интенсивностей полос Герцберга I и Чемберлена в свечении атмосферы Земли, выполненные при помощи сканирующего спектрометра [20] и телескопа Кеск I [21], показали, что на высотах свечения этих эмиссий в ночном небе Земли максимальная населенность колебательных уровней молекулы O_2

Рис. 5. Спектры свечения ночного неба Венеры [16] (а) и активной среды лабораторного разряда [17] (б) в диапазоне 380–680 нм (3800–6800 Å); штриховые линии – чувствительности спектрометров в обоих экспериментах

наблюдается для состояний ($A^3\Sigma_u^+$, $v = 6$ и $A^3\Delta_u$, $v = 6-7$). Кроме того, с помощью инфракрасных спектрометров VIRTIS и SPICAV/SOIR, установленных на аппарате космического агентства Venus-Express, исследователям, участвовавшим в разработке этих приборов и подготовке экспериментов с ними, представилась возможность более детально изучить свечение молекул кислорода на ночной стороне Венеры. В 2013 году группой ученых [22] был опубликован спектр свечения Венеры, полученный с орбитального космического аппарата Venus-Express, оснащенного спектрографом VIRTIS (рис. 6). Эти авторы показали, что, кроме полос Герцберга II, в спектре свечения ночного неба в атмосфере Венеры имеются также полосы Чемберлена. Причем регистрируются полосы, обусловленные переходами с нулевых колебательных уровней состояний $c^1\Sigma_u^-$ и $A^3\Delta_u$ на различные уровни нижележащих состояний.

Таким образом, в результате наблюдений спектров полос молекулярного кислорода в свечении ночного неба Земли и Венеры было обнаружено их принципиальное различие. Заключается оно в следующем: широкий спектр полос Герцберга I и Чемберлена в атмосфере Земли (см. рис. 3), а для Венеры (см. рис. 5) – это система полос

Рис. 6. Спектр свечения ночного неба Венеры с орбитального космического аппарата Venus-Express [22]

Герцберга II, обусловленная переходами с нулевого колебательного уровня состояния $c^1\Sigma_u^-$, $v = 0$, с незначительным вкладом полос Чемберлена (переходы также с нулевого колебательного уровня $A'^3\Delta_u$, $v = 0$).

2. Результаты моделирования колебательной населенностей состояний $A^3\Sigma_u^+$ и $A'^3\Delta_u$ в атмосферах Земли и Венеры

Основным механизмом образования электронно-возбужденного молекулярного кислорода O_2^* на высотах 80–110 км атмосферы Земли, где происходит свечение полос Герцберга I и Чемберлена, являются тройные столкновения с участием атомов кислорода O [5]

где M обозначает молекулы азота или кислорода, концентрации которых значительно превосходят концентрации остальных составляющих на данных высотах атмосферы. Кроме того, необходимо учесть тот факт, что давление на указанном интервале высот порядка 10^{-2} – 10^0 Па и столкновительные времена жизни сравнимы с излучательными, поэтому при моделировании интенсивностей свечения указанных полос необходимо включить вклад межмолекулярных и внутримолекулярных процессов переноса электронного возбуждения с участием O_2^* при столкновениях с невозбужденными молекулами N_2 и O_2 , причем как в процессах гашения, так и при неупругих взаимодействиях (образование O_2^*).

Расчет констант гашения состояний $c^1\Sigma_u^-$, $A'^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$ молекулы кислорода основными составляющими атмосфер планет земной груп-

пы CO_2 , N_2 , O_2 был проведен в работе [23]. При расчете были использованы приближения Ландау–Зинера и Розена–Зинера [24]. На рис. 7 представлено сравнение рассчитанных констант гашения молекулярного кислорода $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+, v = 0-10)$ и $\text{O}_2(c^1\Sigma_u^-, v = 0-16)$ молекулами CO_2 , N_2 , O_2 с экспериментальными данными [25–29]. Как видно из представленного сравнения, более свежие экспериментальные данные для состояний $\text{O}_2(A^3)$ отлично согласуются, однако для гашения состояний $\text{O}_2(c^1)$ молекулами O_2 картина согласованности теории и измерений выглядит удовлетворительно [25, 28, 29]. На основе всех перечисленных процессов при расчете концентраций $\text{O}_2(c^1\Sigma_u^-, v)$, $\text{O}_2(A^3\Delta_u, v)$, $\text{O}_2(A^3\Sigma_u^+, v)$ воспользуемся решением следующей системы уравнений:

$$Q^c q_v^c + \sum_{Y=A^3, A^3; v'} k''^{Yc} [\text{O}_2] N_{v'}^Y + \sum_{Y=c, A^3, A^3; v'} k^{**Yc} [\text{O}_2] N_{v'}^Y =$$

$$= \left\{ A_v^{cX} + k_v'^c [\text{N}_2] + (k_v''^c + k_v^{**c}) [\text{O}_2] + k_v'''^c [\text{CO}_2] + k_o [\text{O}] \right\} N_v^c; \quad (4)$$

$$Q^{A^3} q_v^{A^3} + \sum_{v'} k_{v'v}^{A^3A^3} [\text{N}_2] N_{v'}^{A^3} + \sum_{Y=c, A^3, A^3; v'} k''^{YA^3} [\text{O}_2] N_{v'}^Y +$$

$$+ \sum_{Y=c, A^3, A^3; v'} k^{**YA^3} [\text{O}_2] N_{v'}^Y + \sum_{v'} k'''^{A^3A^3} [\text{CO}_2] N_{v'}^{A^3} =$$

$$= \left\{ A_v^{A^3X} + A_v^{A^3a} + k_v'^{A^3} [\text{N}_2] + \right.$$

$$\left. + (k_v''^{A^3} + k_v^{**A^3}) [\text{O}_2] + k_v'''^{A^3} [\text{CO}_2] + k_o [\text{O}] \right\} N_v^{A^3}; \quad (5)$$

$$Q^A q_v^A + \sum_{v'} k_{v'v}^{A^3A^3} [\text{N}_2] N_{v'}^{A^3} + \sum_{Y=c, A^3, A^3; v'} k''^{YA} [\text{O}_2] N_{v'}^Y +$$

$$+ \sum_{Y=c, A^3, A^3; v'} k^{**YA} [\text{O}_2] N_{v'}^Y + \sum_{v'} k'''^{A^3A^3} [\text{CO}_2] N_{v'}^{A^3} =$$

$$= \left\{ A_v^{AX} + k_v'^A [\text{N}_2] + (k_v''^A + k_v^{**A}) [\text{O}_2] + k_v'''^A [\text{CO}_2] + k_o [\text{O}] \right\} N_v^A, \quad (6)$$

где Q^Y – скорость образования Y -состояния ($c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$) в тройных столкновениях [см. формулу (3)], $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$; q_v^Y и $N_{v'}^Y$ – квантовый выход в процессе (3) и концентрация колебательного уровня v состояния Y ; $A_v^{YZ} = \sum_{v'} A_{vv'}^{YZ}$ – сумма коэффициентов Эйнштейна для спонтан-

ного излучения фотонов при переходах $Y, v \rightarrow Z, v'$; $k'^{YZ}_{vv'}$ и $k'''^{YZ}_{vv'}$ – коэффициенты скоростей внутримолекулярного переноса энергии с потерей Y, v и образованием Z, v' при столкновениях с молекулами N_2 и CO_2 соответственно; $k''^{YZ}_{vv'}$ и $k^{**YZ}_{vv'}$ – коэффициенты скоростей внутримолекулярных и межмолекулярных процессов переноса энергии с потерей Y, v и образованием Z, v' соответственно при столкновении с молекулой O_2 ; $[N_2]$, $[O_2]$, $[CO_2]$ и $[O]$ – концентрации молекулярного азота, кислорода, углекислого газа и атомарного кислорода соответственно.

Рис. 7. Сравнение рассчитанных констант гашения молекулярного кислорода $O_2(A^3\Sigma_u^+, v = 0-10)$ (сплошные линии) и $O_2(c^1\Sigma_u^-, v = 0-16)$ (штрихи) молекулами CO_2 , N_2 , O_2 с экспериментальными данными: $O_2(A^3\Sigma_u^+, v)$ – [25] (крестики), [26] (темные квадраты), [27] (темный треугольник); $O_2(c^1\Sigma_u^-, v)$ – [26] (светлые квадраты), [28] (светлый треугольник), [29] (кружки)

На рис. 8 приведена схема колебательных уровней состояний $c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$ молекулы кислорода, для которых решается система уравнений (4)–(6). Коэффициенты Эйнштейна излучения фотонов полос Герцберга I, II, III и Чемберлена брались согласно работе [30], константа гашения атомарным кислородом $k_O = 3 \cdot 10^{-14} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ – согласно работе [5]. Для величин квантовых выходов q_v^Y колебательных уровней всех трех состояний использовалась аналитическая аппроксимация, предложенная в статье [31].

На рис. 9 приведены рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга молекулы кислорода ($c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^+$) на высоте 95 км в атмосфере Земли. Аналогичные результаты расчетов для вы-

соты 100 км в атмосфере Венеры также приведены на рис. 9. Как было показано в работе [32], запрещенный по спину процесс

когда молекула кислорода переходит из состояния $A^3\Delta_u$ в $c^1\Sigma_u^-$, а в молекуле CO_2 происходит возбуждение симметричной колебательной моды, ускоряет процесс переноса энергии. В связи с этим в дополнение к разрешенным по спину процессам гашения состояния в формулах (4) и (5) был учтен процесс (7).

Рис. 8. Схема колебательных уровней состояний Герцберга O_2

Рис. 9. Рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга ($c^1\Sigma_u^-$, $A^3\Delta_u$, $A^3\Sigma_u^-$) на высоте 95 км в атмосфере Земли (а) и на высоте 100 км в атмосфере Венеры (б)

Как показали результаты расчетов (см. рис. 9), для атмосферы Земли максимум относительной населенности триплетных состояний Герцберга в ночной атмосфере приходится на 6–8-й колебательные уровни, поэтому в спектре свечения ночного неба Земли наблюдаются различные полосы, обусловленные излучательными переходами с этих и близлежащих колебательных уровней состояний $A^3\Sigma_u^+$ и $A'^3\Delta_u$ (см. рис. 3). Для атмосферы Венеры, где доминирует двуокись углерода, расчеты показали, что столкновительные процессы приводят к аккумуляции энергии на нулевых колебательных уровнях состояний $c^1\Sigma_u^-$ и $A'^3\Delta_u$, поэтому при спектральных наблюдениях с космических летательных аппаратов [16, 19, 22] наблюдались полосы Герцберга II и Чемберлена, обусловленные спонтанными переходами с нулевых колебательных уровней указанных состояний.

Что касается интенсивностей свечения полос Герцберга I, II и Чемберлена для атмосферы Марса, то они были выполнены В.А. Краснопольским [33]. Поскольку плотность атмосферы Марса на высотах свечения ночного неба меньше соответствующей плотности атмосферы Венеры (см. рис. 4), расчеты [33] показали, что интенсивности свечения полос Герцберга I, II и Чемберлена в атмосфере Марса более чем на порядок меньше интенсивностей, зарегистрированных с космических летательных аппаратов вокруг Венеры.

Заключение

Проанализированы экспериментальные и теоретические данные по константам взаимодействия электронно-возбужденных молекул кислорода с различными газами: CO_2 , N_2 , O_2 , CO . Данные по константам взаимодействия $\text{O}_2(c^1\Sigma_u^-, A'^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+)$ с различными молекулами использованы при моделировании колебательных населенностей состояний Герцберга для высот свечения ночного неба в атмосферах планет земной группы Земли и Венеры. Было показано, что рассчитанные колебательные населенности состояний Герцберга имеют разную зависимость от колебательного номера для рассмотренных случаев:

- максимум относительной населенности триплетных состояний Герцберга в ночной атмосфере Земли приходится на 6–8-й колебательные уровни;

- аккумуляция энергии на нулевых колебательных уровнях состояний $c^1\Sigma_u^-$ и $A'^3\Delta_u$ в ночной атмосфере Венеры.

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными [16, 20–22], полученными для ночных свечений атмосфер Земли и Венеры соответственно.

Список литературы

1. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Параметры атомов и атомных ионов: справ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 344 с.
2. Vallance J.A. Aurora: geophysical and astrophysical monograph. – Dordrecht, 1974.
3. Henriksen K., Sivjee G.G. Auroral vibrational population of the $O_2(b^1\Sigma_g^+, v')$ levels // Planetary and Space Science. – 1990. – Vol. 38, № 7. – P. 835–840.
4. Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.I. Atlas of the airglow spectrum 3000–12400 Å // Planetary and Space Science. – 1962. – Vol. 9, № 12. – P. 883–915.
5. Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. – М.: ГЕОС, 2006. – 740 с.
6. Broadfoot A.L., Bellaire P.J. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow // Journal of Geophysical Research. – 1999. – Vol. 104, № A8. – P. 17127–17138.
7. Kossyi I.A., Kostinsky A.Yu., Matveyev A.A., Silakov V.P. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures // Plasma Source Science and Technology. – 1992. – Vol. 1, № 3. – P. 207–220.
8. Gordillo-Vazquez F.J. Air plasma kinetics under the influence of sprites // Journal of Physics D. Applied Physics. – 2008. – Vol. 41, № 23. – P. 234016.
9. Юрышев Н.Н. Кислородно-иодный лазер с химической накачкой // Квантовая электроника. – 1996. – Т. 23, № 7. – С. 583–600.
10. Генерация синглетного кислорода для кислородно-иодного лазера в высокочастотном разряде / О.В. Брагинский, А.Н. Васильева, К.С. Клоповский, А.С. Ковалев, Д.В. Лопаев, Ю.А. Манкелевич, Н.А. Попов, А.Т. Рахимов, Т.В. Рахимова // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35, № 1. – С. 21–26.
11. Physics and engineering of singlet delta oxygen production in low-temperature plasma / A.A. Ionin, I.V. Kochetov, A.P. Napartovich,

N.N. Yuryshev // Journal of Physics D. Applied Physics. – Vol. 40, № 2. – P. R25–R61.

12. Липатов Н.И., Бирюков А.С., Гулямова Э.С. Световой котел – генератор синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38, № 12. – С. 1179–1182.

13. Krasnopolsky V.A. Venus night airglow: ground-based detection of OH, observations of O_2 emissions, and photochemical model // Icarus. – 2010. – Vol. 207, № 1. – P. 17–27.

14. Krasnopolsky V.A. Solar activity variations of thermospheric temperatures on Mars and a problem of CO in the lower atmosphere // Icarus. – 2010. – Vol. 207, № 2. – P. 638–647.

15. Neutral atmospheric composition between 60 and 220 km: a theoretical model for mid-latitudes / R. Rodrigo, J.J. Lopez-Moreno, M. Lopez-Puertas, F. Moreno, A. Molina // Planetary and Space Science. – 1986. – Vol. 34, № 8. – P. 723–743.

16. Спектроскопия ночного свечения Венеры на АМС «Венера-9» и «Венера-10» / В.А. Краснопольский, А.А. Крысько, В.Н. Рогачев, В.А. Паршев // Космические исследования. – 1976. – Т. 14, № 5. – С. 789–795.

17. Lawrence G.M., Barth C.A., Argabright V. Excitation of the Venus night airglow // Science. – 1977. – Vol. 195, № 4278. – P. 573–574.

18. Slanger T.G. Generation of $O_2(c^1\Sigma_u^-, C^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+)$ from oxygen atom recombination // Journal of Chemical Physics. – 1978. – Vol. 69, № 11. – P. 4779–4791.

19. Slanger T.G., Black G. The $O_2(C^3\Delta_u \rightarrow a^1\Delta_g)$ bands in the night-glow spectrum of Venus // Geophysical Research Letters. – 1978. – Vol. 5, № 11. – P. 947–948.

20. Stegman J. and Murtagh D.P. High resolution spectroscopy of oxygen u.v. airglow // Planetary and Space Science. – 1988. – Vol. 36, № 9. – P. 927–934.

21. Nightglow vibrational distributions in the $A^3\Sigma_u^+$ and $A^3\Delta_u$ states of O_2 derived from astronomical sky spectra / T.G. Slanger, P.C. Cosby, D.L. Huestis, A.M. Widhalm // Annales Geophysicae. – 2004. – Vol. 22, № 9. – P. 3305–3314.

22. The characteristics of the O_2 Herzberg II and Chamberlain bands observed with VIRTIS/Venus Express / A. Migliorini, G. Piccioni,

J.C. Gerard, L. Soret, T.G. Slanger, R. Politi, M. Snels, P. Drossart, F. Nuccilli // *Icarus*. – Vol. 223, № 1. – P. 609–614.

23. 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. – Vol. 592. – P. 103–108.

24. Никитин Е.Е. Теория элементарных атомно-молекулярных процессов в газах. – М.: Химия, 1970. – 455 с.

25. Knutsen K., Dyer M.J., Copeland R.A. Laser double-resonance study of the collisional removal of O₂(A³Σ_u⁺, ν = 6, 7, and 9) with O₂, N₂, CO₂, Ar, and He // *Journal of Chemical Physics*. – 1994. – Vol. 101, № 9. – P. 7415–7422.

26. Kenner R.D., Ogryzlo E.A. Quenching of O₂(c¹Σ_u[–]) ν = 0 by O(³P), O₂(a¹Δ_g), and other gases // *Canadian Journal of Chemistry*. – 1983. – Vol. 61, № 5. – P. 921–926.

27. Kenner R.D., Ogryzlo E.A. Rate constant for the deactivation of O₂(A³Σ_u⁺) by N₂ // *Chemical Physics Letters*. – 1983. – Vol. 103, № 3. – P. 209–212.

28. Collisional removal of O₂(c¹Σ_u[–], ν = 9) by O₂, N₂, and He / R.A. Copeland, K. Knutsen, M.E. Onishi, T. Yalcin // *Journal of Chemical Physics*. – 1996. – Vol. 105, № 23. – P. 10349–10355.

29. Slanger T.G., Copeland R.A. Energetic oxygen in the upper atmosphere and the laboratory // *Chemical Reviews*. – 2003. – Vol. 103, № 12. – P. 4731–4766.

30. Bates D.R. Oxygen band system transition arrays // *Planetary and Space Science*. – 1986. – Vol. 37, № 7. – P. 881–887.

31. Кириллов А.С. Моделирование населенностей колебательных уровней состояний молекулярного кислорода, исходных для полос Герцберга, на высотах нижней термосферы и мезосферы // *Геомагнетизм и аэронавтика*. – 2012. – Т. 52, № 2. – С. 258–264.

32. Kirillov A.S. Calculated vibrational populations of O₂ Herzberg states in the mixture of CO₂, CO, N₂, O₂ gases // *Chemical Physics Letters*. – 2014. – Vol. 603. – P. 89–94.

33. Krasnopolsky V.A. Excitation of the oxygen nightglow on the terrestrial planets // *Planetary and Space Science*. – 2011. – Vol. 59, № 8. – P. 754–766.

References

1. Radtsig A.A., Smirnov B.M. Parametry atomov i atomnykh ionov [The parameters of atoms and atomic ions]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 344 p.
2. Vallance J.A. Aurora, geophysical and astrophysical monograph. Dordrecht, 1974.
3. Henriksen K., Sivjee G.G. Auroral vibrational population of the $O_2(b^1\Sigma_g^+, v')$ levels. *Planetary and Space Science*, 1990, vol. 38, no. 7, pp. 835-840.
4. Krassovsky V.I., Shefov N.N., Yarin V.I. Atlas of the airglow spectrum 3000–12 400 Å. *Planetary and Space Science*, 1962, vol. 9, no. 12, pp. 883-915.
5. Shefov N.N., Semenov A.I., Khomich V.Iu. Izluchenie verkhnei atmosfery – indikator ee struktury i dinamiki [The radiation of the upper atmosphere is an indicator of its structure and dynamics]. Moscow: Geos, 2006. 740 p.
6. Broadfoot A.L., Bellaire P.J. Bridging the gap between ground-based and space-based observations of the night airglow. *Journal of Geophysical Research*, 1999, vol. 104, no. A8, pp. 17127-17138.
7. Kossyi I.A., Kostinsky A.Yu., Matveyev A.A., Silakov V.P. Kinetic scheme of the non-equilibrium discharge in nitrogen-oxygen mixtures. *Plasma Source Science and Technology*, 1992, vol. 1, no. 3, pp. 207-220.
8. Gordillo-Vazquez F.J. Air plasma kinetics under the influence of sprites. *Journal of Physics D. Applied Physics*, 2008, vol. 41, no. 23, p. 234016.
9. Iuryshv N.N. Kislородno-iodnyi lazer s khimicheskoi nakachkoi [The oxygen-iodine laser with the chemical pump]. *Kvantovaya elektronika*, 1996, vol. 23, no. 7, pp. 583-600.
10. Braginskii O.V., Vasil'eva A.N., Klopovskii K.S., Kovalev A.S., Lopaev D.V., Mankelevich Iu.A., Popov N.A., Rakhimov A.T., Rakhimova T.V. Generatsiia singletnogo kisloroda dlia kislorodno-iodnogo lazera v vysokochastotnom razriade [Generation of singlet oxygen for oxygen-iodine laser frequency discharge]. *Kvantovaya elektronika*, 2005, vol. 35, no. 1, pp. 21-26.
11. Ionin A.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Yuryshv N.N. Physics and engineering of singlet delta oxygen production in low-temperature plasma. *Journal of Physics D. Applied Physics*, vol. 40, no. 2, pp. R25-R61.

12. Lipatov N.I., Biriukov A.S., Guliamova E.S. Svetovoi kotel – generator singletnogo kisloroda $O_2(a^1\Delta_g)$ [Light cauldron is a generator of singlet oxygen]. *Kvantovaya elektronika*, 2008, vol. 38, no. 12, pp. 1179-1182.

13. Krasnopolsky V.A. Venus night airglow: ground-based detection of OH, observations of O_2 emissions, and photochemical model. *Icarus*, 2010, vol. 207, no. 1, pp. 17-27.

14. Krasnopolsky V.A. Solar activity variations of thermospheric temperatures on Mars and a problem of CO in the lower atmosphere. *Icarus*, 2010, vol. 207, no. 2, pp. 638-647.

15. Rodrigo R., Lopez-Moreno J.J., Lopez-Puertas M., Moreno F., Molina A. Neutral atmospheric composition between 60 and 220 km: a theoretical model for mid-latitudes. *Planetary and Space Science*, 1986, vol. 34, no. 8, pp. 723-743.

16. Krasnopol'skii V.A., Kry's'ko A.A., Rogachev V.N., Parshev V.A. Spektroskopiia nochnogo svecheniia Venery na avtomaticheskikh mezhplanetnykh stantsiiakh “Venera-9” i “Venera-10” [Spectroscopy of night glow on Venus automatic interplanetary stations Venera-9 and Venera-10]. *Kosmicheskie issledovaniia*, 1976, vol. 14, no. 5, pp. 789-795.

17. Lawrence G.M., Barth C.A., Argabright V. Excitation of the Venus night airglow. *Science*, 1977, vol. 195, no. 4278, pp. 573-574.

18. Slanger T.G. Generation of $O_2(c^1\Sigma_u^-, C^3\Delta_u, A^3\Sigma_u^+)$ from oxygen atom recombination. *Journal of Chemical Physics*, 1978, vol. 69, no. 11, pp. 4779-4791.

19. Slanger T.G., Black G. The $O_2(C^3\Delta_u \rightarrow a^1\Delta_g)$ bands in the night-glow spectrum of Venus. *Geophysical Research Letters*, 1978, vol. 5, no. 11, pp. 947-948.

20. Stegman J., Murtagh D.P. High resolution spectroscopy of oxygen u.v. airglow. *Planetary and Space Science*, 1988, vol. 36, no. 9, pp. 927-934.

21. Slanger T.G., Cosby P.C., Huestis D.L., Widhalm A.M. Night-glow vibrational distributions in the $A^3\Sigma_u^+$ and $A'^3\Delta_u$ states of O_2 derived from astronomical sky spectra. *Annales Geophysicae*, 2004, vol. 22, no. 9, pp. 3305-3314.

22. Migliorini A., Piccioni G., Gerard J.C., Soret L., Slanger T.G., Politi R., Snels M., Drossart P., Nuccilli F. The characteristics of the O_2 Herzberg II and Chamberlain bands observed with VIRTIS/Venus Express. *Icarus*, vol. 223, no. 1, pp. 609-614.

23. 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, vol. 592, pp. 103-108.

24. Nikitin E.E. Teoriia elementarnykh atomno-molekuliarnykh protsessov v gazakh [The theory of elementary atomic-molecular processes in gases]. Moscow: Khimiia, 1970. 455 p.

25. Knutsen K., Dyer M.J., Copeland R.A. Laser double-resonance study of the collisional removal of O₂(A³Σ_u⁺, v = 6, 7, and 9) with O₂, N₂, CO₂, Ar, and He. *Journal of Chemical Physics*, 1994, vol. 101, no. 9, pp. 7415-7422.

26. Kenner R.D., Ogryzlo E.A. Quenching of O₂(c¹Σ_u⁻) v = 0 by O(³P), O₂(a¹Δ_g), and other gases. *Canadian Journal of Chemistry*, 1983, vol. 61, no. 5, pp. 921-926.

27. Kenner R.D., Ogryzlo E.A. Rate constant for the deactivation of O₂(A³Σ_u⁺) by N₂. *Chemical Physics Letters*, 1983, vol. 103, no. 3, pp. 209-212.

28. Copeland R.A., Knutsen K., Onishi M.E., Yalcin T. Collisional removal of O₂(c¹Σ_u⁻, v = 9) by O₂, N₂, and He. *Journal of Chemical Physics*, 1996, vol. 105, no. 23, pp. 10349-10355.

29. Slanger T.G., Copeland R.A. Energetic oxygen in the upper atmosphere and the laboratory. *Chemical Reviews*, 2003, vol. 103, no. 12, pp. 4731-4766.

30. Bates D.R. Oxygen band system transition arrays. *Planetary and Space Science*, 1986, vol. 37, no. 7, pp. 881-887.

31. Kirillov A.S. Modelirovanie naselennosti kolebatel'nykh urovnei sostoianii molekuliarnogo kisloroda, iskhodnykh dlia polos Gertsberga, na vysotakh nizhnei termosfery i mezosfery [Simulation conditions of the populations of the vibrational levels of molecular oxygen source for the Herzberg bands, on the heights of the mesosphere and lower thermosphere]. *Geomagnetizm i aeronomiia*, 2012, vol. 52, no. 2, pp. 258-264.

32. Kirillov A.S. Calculated vibrational populations of O₂ Herzberg states in the mixture of CO₂, CO, N₂, O₂ gases. *Chemical Physics Letters*, 2014, vol. 603, pp. 89-94.

33. Krasnopol'sky V.A. Excitation of the oxygen nightglow on the terrestrial planets. *Planetary and Space Science*, 2011, vol. 59, no. 8, pp. 754-766.