

Научная статья
УДК 681.3+533.951
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.2.008

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА НА ИНФРАКРАСНОЕ СВЕЧЕНИЕ ГАЗОВ O_3 И N_2O НА ВЫСОТАХ СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Андрей Серафимович Кириллов¹, Владимир Борисович Белаховский²

^{1, 2}Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

¹<https://orcid.org/0000-0002-0790-3195>

²<https://orcid.org/0000-0001-8994-4363>

Аннотация

Проведены расчеты концентраций $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ и интенсивностей свечения инфракрасных полос озона O_3 и закиси азота N_2O на высотах 30–70 км средней атмосферы Земли при выпадении электронов с энергиями $E = 2, 4, 10$ МэВ. Показано, что при заданном потоке релятивистских электронов 10^5 эл/см²·с-стер концентрации колебательно-возбужденного молекулярного азота $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ получаются порядка 10^5 – 10^6 см⁻³ на высотах 50–70 км средней атмосферы. Проведен расчет профилей свечения инфракрасных полос озона 4,7 и 9,9 мкм, а также инфракрасной полосы закиси азота 4,5 мкм для выпадения высокоэнергичных электронов с энергиями $E = 2, 4, 10$ МэВ. Впервые показано, что колебательно-возбужденный азот $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ принимает активное участие в изменении инфракрасного баланса средней атмосферы в результате неупругих молекулярных столкновений с молекулами O_3 и N_2O во время выпадений высокоэнергичных электронов.

Ключевые слова:

колебательно-возбужденный молекулярный азот, озон, закись азота, инфракрасное свечение, средняя атмосфера Земли

Благодарности:

исследование выполнено при поддержке РФФ (проект № 18-77-10018).

Original article

THE INFLUENCE OF VIBRATIONALLY EXCITED MOLECULAR NITROGEN ON INFRARED EMISSIONS OF O_3 AND N_2O GASES AT ALTITUDES OF THE MIDDLE ATMOSPHERE

Andrey S. Kirillov¹, Vladimir B. Belakhovsky²

^{1, 2}Polar Geophysical Institute, Apatity

¹<https://orcid.org/0000-0002-0790-3195>

²<https://orcid.org/0000-0001-8994-4363>

Abstract

The concentrations of $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ and the emission intensities of infrared bands of ozone O_3 and nitrous oxide N_2O are calculated at altitudes of 30–70 km of the Earth's middle atmosphere during precipitation of electrons with energies $E = 2, 4, 10$ MeV. It is shown that for a given relativistic electron flux of 10^5 e/cm²·s-ster, the concentrations of vibrationally excited molecular nitrogen $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ are about 10^5 – 10^6 cm⁻³ at altitudes of 50–70 km of the middle atmosphere. The emission profiles of the infrared bands of ozone at 4.7 μ m and 9.9 μ m, as well as the infrared band of nitrous oxide at 4.5 μ m, are calculated for precipitation of high-energy electrons with energies $E = 2, 4, 10$ MeV. It has been shown for the first time that vibrationally excited nitrogen $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ plays an important role in changing the infrared balance of the middle atmosphere as a result of inelastic molecular collisions with O_3 and N_2O molecules during precipitation of high-energy electrons.

Keywords:

vibrationally excited molecular nitrogen, ozone, nitrous oxide, infrared emissions, Earth's middle atmosphere

Acknowledgments:

the study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 18-77-10018).

Введение

Молекулярный азот и молекулярный кислород являются основными составляющими средней атмосферы Земли. Неупругое взаимодействие выпадающих в атмосферу высокоэнергичных частиц (релятивистских электронов и протонов) с молекулами N_2 и O_2 приводит к возбуждению различных синглетных и триплетных электронно-возбужденных состояний N_2 и O_2 . В дальнейшем в возбужденных молекулах происходят спонтанные переходы на более низкие по энергии состояния, что служит причиной свечения этих молекулярных составляющих в различных диапазонах спектра. В работах (Кириллов и Белаховский, 2020а, 2020б; Kirillov and Belakhovsky, 2021) был проведен расчет профилей интенсивностей свечения полос первой (1PG) и второй (2PG) положительных систем и полос Лаймана – Бирджа – Хопфилда (LBH) молекулярного азота:



а также полос Атмосферной (Atm) и Инфракрасной Атмосферной (IRAtm) систем молекулярного кислорода:



в случае высыпания в атмосферу высокоэнергичных электронов с энергиями до 10 МэВ.

Расчеты показали, что с ростом энергии вторгающихся в атмосферу электронов возрастает вклад процессов гашения состояний $B^3\Pi_g$ и $a^1\Pi_g$ N_2 , $b^1\Sigma_g^+$ O_2 при молекулярных столкновениях. Это приводит к тому, что в результате неупругих столкновительных процессов энергия возбуждения аккумулируется на различных колебательных уровнях основных состояний данных молекул. Частоты колебаний N_2 и O_2 могут находиться в резонансе с частотами колебаний малых атмосферных составляющих, поэтому при неупругих столкновениях энергия возбуждения может переходить в энергию колебаний малых атмосферных составляющих. Они же, в свою очередь, могут эффективно излучать инфракрасные эмиссии, изменяя излучательный баланс средней атмосферы.

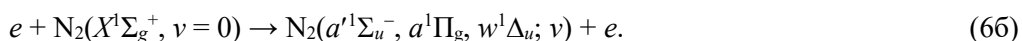
Цель данной работы состоит в моделировании колебательной кинетики основного состояния молекулярного азота на высотах средней атмосферы 30–70 км при вторжении релятивистских электронов с энергиями $E = 2, 4$ и 10 МэВ. При этом будут рассмотрены процессы переноса энергии возбуждения с молекулярного азота $\text{N}_2(X^1\Sigma_g^+, v'' = 1)$ на молекулы озона O_3 и закиси азота N_2O при неупругих молекулярных столкновениях. Кроме того, будут рассчитаны интенсивности свечения инфракрасных полос 4,7 и 9,9 мкм озона и 4,5 мкм закиси азота на указанных высотах во время вторжения релятивистских электронов.

Колебательно-возбужденные молекулы $\text{N}_2(X^1\Sigma_g^+)$

Как и в предыдущих работах (Кириллов и Белаховский, 2020a, 2020b; Kirillov and Belakhovsky, 2021), здесь аналогично рассматривается возбуждение пяти триплетных состояний молекулярного азота при столкновениях молекул $\text{N}_2(X^1\Sigma_g^+, v = 0)$ со вторичными электронами, образующимися в процессах ионизации на высотах средней атмосферы:

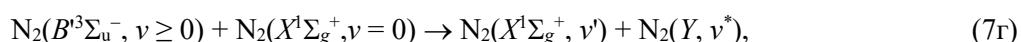
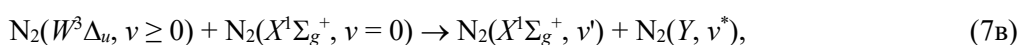
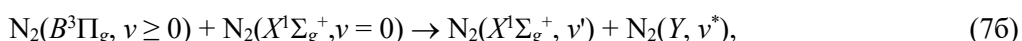
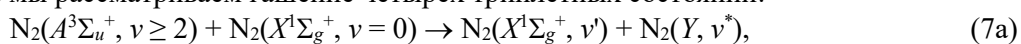


а также возбуждение трех синглетных состояний N_2 :

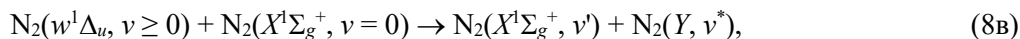
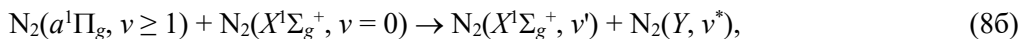
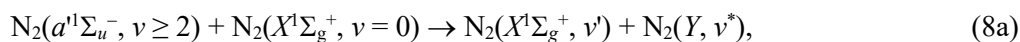


Процессы межмолекулярного переноса энергии возбуждения при неупругих столкновениях молекул на высотах средней атмосферы приводят как к электронному возбуждению молекулы-мишени, так и к колебательному возбуждению в основном состоянии первично возбужденной молекулы. Процессы внутримолекулярного переноса энергии возбуждения способствуют образованию колебательно-возбужденных молекул при переходах из электронно-возбужденного состояния в основное состояние $X^1\Sigma_g^+$ при неупругих столкновениях.

Коэффициенты скоростей гашения электронно-возбужденных состояний N_2 и образования колебательно-возбужденных $\text{N}_2(X^1\Sigma_g^+, v' > 0)$ в межмолекулярных процессах рассчитаны в работе (Kirillov, 2012). Здесь мы рассматриваем гашение четырех триплетных состояний:

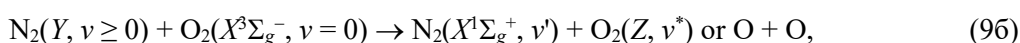
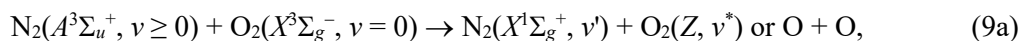


где в процессах (7а–7г) Y означает учет всех четырех $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B^3\Sigma_u^-$ триплетных состояний N_2 , а также гашение трех синглетных состояний:



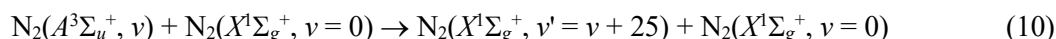
где в процессах (8а–8в) Y означает учет всех трех $a^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$ синглетных состояний N_2 . Мы применяем здесь коэффициенты скоростей, рассчитанные в работе (Kirillov, 2012).

Рассматриваются также процессы гашения четырех триплетных и трех синглетных состояний N_2 при столкновениях с молекулярным кислородом:



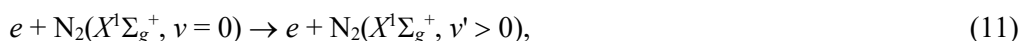
где Y — это триплетные состояния $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B^3\Sigma_u^-$ и синглетные состояния $a^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$, Z , означает электронно-возбужденные состояния O_2 и переходы в континуумах Герцберга или Шумана – Рунге, или возбуждение отталкивающих состояний O_2 . Рассчитанные в работе (Kirillov, 2012) коэффициенты скоростей для процессов (9а) и (9б) используются при настоящих расчетах.

Также мы рассматриваем здесь внутримолекулярный процесс переноса энергии электронов:

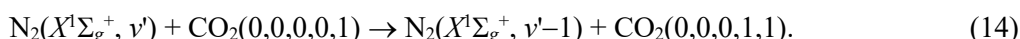
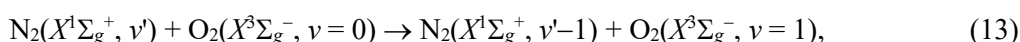
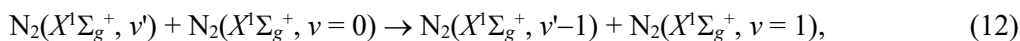


для низших уровней $v = 0-5$ состояния $A^3\Sigma_u^+$. Коэффициенты скоростей $k_{10}(v = 0) = 2,0 \times 10^{-18} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$ и $k_{10}(v = 1) = 4,0 \times 10^{-17} \text{ см}^3\text{с}^{-1}$ для процесса (10) для двух колебательных уровней $v = 0, 1$ принимаются в расчетах согласно экспериментальным данным работы Levron and Phelps, 1978).

Кроме того, мы учитываем процессы образования и тушения колебательно-возбужденных молекул $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' > 0)$ в следующих процессах:



где e означает вторичные электроны, и процессы колебательно-колебательного обмена энергией:



На рисунке 1 приведены высотные профили скоростей ионообразования в средней атмосфере 30–70 км для моноэнергетического потока электронов с энергиями $E = 2, 4, 10 \text{ МэВ}$ и потоками $10^5 \text{ эл/см}^2\cdot\text{с}$ стер согласно работе (Turunen et al., 2009). Также на рисунке 1 представлены профили интенсивностей свечения полосы 337 нм (излучательный переход (2)) второй положительной системы молекулярного азота. Как видно из рисунка 1, гашение состояния $C^3\Pi_u$ очень мало, поскольку для данных высот столкновительное время жизни (Kirillov, 2019) намного больше излучательного (Gilmore et al., 1992), поэтому профили свечения практически повторяют по форме профили скоростей ионообразования на рассмотренных высотах.

На рисунке 2 приведены рассчитанные концентрации $[N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)]$ на высотах 30–70 км при высыпании электронов с энергиями $E = 2, 4, 10 \text{ МэВ}$. При расчете учтены процессы (7а–7г), (8а–8в), (9а, 9б), (10), (11), при которых образуются колебательно-возбужденные молекулы азота $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' > 0)$. Как видно из рисунка 2, концентрации колебательно-возбужденного молекулярного азота $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ получаются порядка $10^5-10^6 \text{ см}^{-3}$ на высотах 50–70 км.

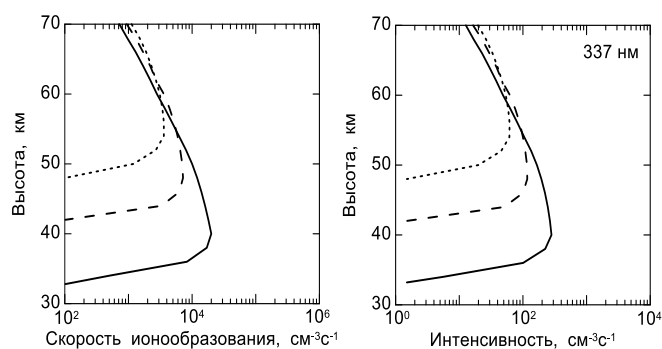


Рис. 1. Слева: скорости ионизации согласно работе сно (Turunen et al., 2009) при высыпании электронов с энергиями $E = 2, 4, 10$ МэВ (короткие штрихи, длинные штрихи, сплошная линия соответственно). Справа: рассчитанные интенсивности свечения полосы 337 нм N_2 (обозначения аналогично левому рисунку)

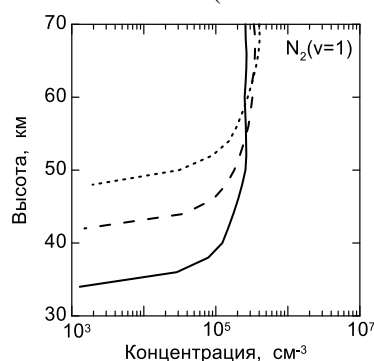
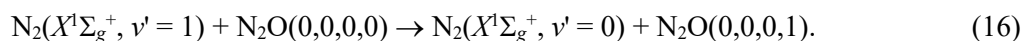
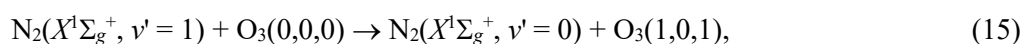


Рис. 2. Рассчитанные концентрации $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ на высотах 30–70 км при высыпании электронов с энергиями $E = 2, 4, 10$ МэВ (обозначения как на рис. 1)

Инфракрасное свечение N_2O и O_3 в средней атмосфере

Энергия колебательно-возбужденного молекулярного азота $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ $E_{N_2} = 2330$ cm^{-1} находится в хорошем энергетическом резонансе с колебательными модами озона $O_3(101)$ ($E_{O_3} = 2111$ cm^{-1}) и закиси азота $N_2O(0001)$ ($E_{N_2O} = 2224$ cm^{-1}) (Funke et al., 2012). Поэтому при столкновении колебательно-возбужденных молекул азота с невозбужденными молекулами озона и закиси азота эффективно протекают реакции переноса энергии колебательного возбуждения:

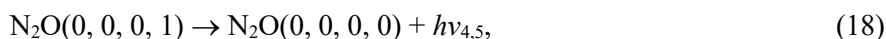


При расчетах мы используем $k_{15} = 2,4 \times 10^{-14}$ $cm^3 s^{-1}$ согласно работе (Robertshaw and Smith, 1980) и $k_{16} = 2,8 \times 10^{-13}$ $cm^3 s^{-1}$ согласно работе (Taylor, 1974).

Колебательно-возбужденная молекула озона $O_3(1,0,1)$ излучает инфракрасные эмиссии 4,7 и 9,9 мкм при следующих спонтанных переходах:

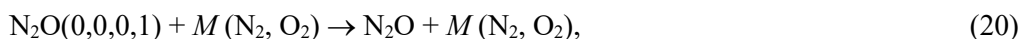
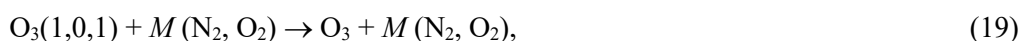


причем коэффициенты Эйнштейна для данных переходов (17a) и (17b) равны следующим значениям: $A_{4,7} = 4,35$ s^{-1} и $A_{9,9} = 10,7$ s^{-1} (Funke et al., 2012). Колебательно-возбужденная молекула закиси азота $N_2O(0,0,0,1)$ излучает инфракрасную эмиссию 4,5 мкм при спонтанном переходе:



где коэффициент Эйнштейна для перехода (18) равен $A_{4,5} = 213$ s^{-1} (Funke et al., 2012).

Кроме процессов гашения, при спонтанных излучательных переходах (17a, 17b) и (18) необходимо учесть неупругие молекулярные столкновения:



при которых происходит гашение колебательного возбуждения рассматриваемых уровней. Константы скоростей процессов (19) и (20) берутся согласно экспериментальным данным в работах (Menard et al., 1992; Gueguen et al., 1975).

На рисунке 3 представлены профили концентраций озона O_3 и закиси азота N_2O для рассматриваемого интервала высот 30–70 км. На рисунке 4 приведены рассчитанные профили свечения инфракрасных эмиссий озона 4,7 и 9,9 мкм для выпадения высокоэнергичных электронов с энергиями $E = 2, 4, 10$ МэВ, а на рис. 5 — аналогичные профили для инфракрасной эмиссии закиси азота 4,5 мкм. Поскольку основным механизмом образования колебательно-возбужденных молекул O_3 и N_2O , а также свечения рассмотренных инфракрасных полос являются реакции (15) и (16), можно отметить, что колебательно-возбужденный азот $\text{N}_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ принимает активное участие в изменении инфракрасного баланса средней атмосферы во время выпадений высокоэнергичных электронов.

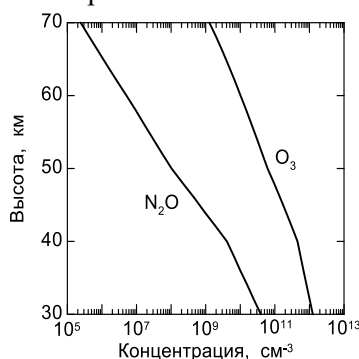


Рис. 3. Профили концентраций озона O_3 и закиси азота N_2O для высот 30–70 км

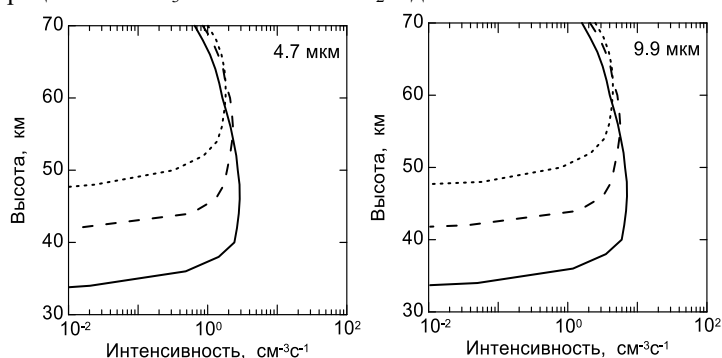


Рис. 4. Рассчитанные профили свечения инфракрасных полос озона 4,7 и 9,9 мкм при выпадении высокоэнергичных электронов с энергиями $E = 2, 4, 10$ МэВ (обозначения как на рис. 1)

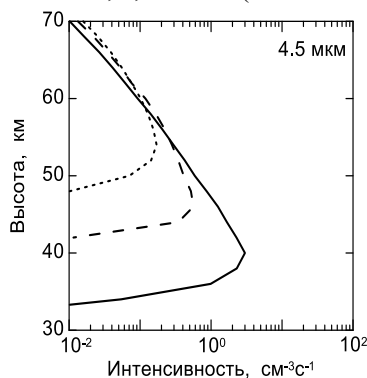


Рис. 5. Рассчитанные профили свечения инфракрасной полосы закиси азота 4,5 мкм при выпадении высокоэнергичных электронов с энергиями $E = 2, 4, 10$ МэВ (обозначения как на рис. 1)

Заключение

Проведены расчеты концентраций $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ и интенсивностей свечения инфракрасных полос озона O_3 и закиси азота N_2O на высотах 30–70 км средней атмосферы Земли при высыпании электронов с энергиями $E = 2, 4, 10$ МэВ. Скорости ионообразования брались согласно рассчитанным профилям в работе (Turunen et al., 2009). Основные результаты настоящих расчетов сводятся к следующему.

1. Показано, что при заданном потоке релятивистских электронов 10^5 эл/см²·с стер концентрации колебательно-возбужденного молекулярного азота $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ получаются порядка 10^5 – 10^6 см⁻³ на высотах 50–70 км средней атмосферы. Расчет проведен с учетом процессов образования колебательно-возбужденного молекулярного азота $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' > 0)$ в результате неупругих молекулярных процессов (7а–7г), (8а–8в), (9а, 9б), (10), (11).

2. Проведен расчет профилей свечения инфракрасных полос озона 4,7 и 9,9 мкм, а также инфракрасной полосы закиси азота 4,5 мкм, для высыпания высокоэнергичных электронов с энергиями $E = 2, 4, 10$ МэВ. Впервые показано, что колебательно-возбужденный азот $N_2(X^1\Sigma_g^+, v' = 1)$ принимает активное участие в изменении инфракрасного баланса средней атмосферы в результате реакций (15) и (16) во время высыпаний высокоэнергичных электронов.

Список источников

1. Кириллов А. С., Белаховский В. Б. Свечение полос молекулярного азота в атмосфере Земли во время высыпания высокоэнергичных электронов // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2020а. Т. 60, № 1. С. 93–98.
2. Кириллов А. С., Белаховский В. Б. Свечение полос Лаймана-Бирджа-Хопфилда N_2 в атмосфере Земли во время высыпания высокоэнергичных электронов // Геомагнетизм и Аэронавигация. 2020б. Т. 60, № 6. С. 796–802.
3. Funke B., Lopez-Puertas M., Garcia-Comas M., Kaufmann M., Höpfner M., Stiller G.P. GRANADA: A Generic RAdiative traNsfer AnD non-LTE population algorithm // J. Quant. Spec. Rad. Tran. 2012. V. 113, № 14. P. 1771–1817.
4. Gilmore F. R., Laher R. R., Espy, P. J. Franck-Condon factors, r-centroids, electronic transition moments, and Einstein coefficients for many nitrogen and oxygen band systems // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1992. V. 21, № 5. P. 1005–1107.
5. Gueguen H., Yazambart F., Chakraborty A., Margottin-Maclou M., Doyennette L., Henry L. Temperature dependence of the vibration-vibration transfer rates from CO_2 and N_2O excited in the (0001) vibrational level to $^{14}N_2$ and $^{15}N_2$ molecules // Chem. Phys. Lett. 1975. V. 35, № 2. P. 198–201.
6. Kirillov A. S. Influence of electronically excited N_2 and O_2 on vibrational kinetics of these molecules in the lower thermosphere and mesosphere during auroral electron precipitation // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2012. V. 81–82. P. 9–19.
7. Kirillov A. S. Intermolecular electron energy transfer processes in the quenching of $N_2(C^3\Pi_u, v = 0-4)$ by collisions with N_2 molecules // Chem. Phys. Lett. 2019. V. 715. P. 263–267.
8. Kirillov A. S., Belakhovsky V. B. The kinetics of O_2 singlet electronic states in the upper and middle atmosphere during energetic electron precipitation // Journal of Geophysical Research: Atmosphere. 2021. V. 126, e2020JD033177.
9. Levron D., Phelps A. V. Quenching of $N_2(A^3\Sigma_u^+, v = 0,1)$ by N_2 , Ar, and H_2 // J. Chem. Phys. 1978. V. 69, № 5. P. 2260–2262.
10. Menard J., Doyennette L., Menard-Bourcin F. Vibrational relaxation of ozone in O_3-O_2 and O_3-N_2 gas mixtures from infrared double-resonance measurements in the 200–300 K temperature range // J. Chem. Phys. 1992. V. 96, № 8. P. 5773–5780.
11. Robertshaw J. S., Smith I. W. M. Vibrational energy transfer from $CO(v = 1)$, $N_2(v = 1)$, $CO_2(001)$, $N_2O(001)$ and $OCS(001)$ to O_3 // J. Chem. Soc. Far. Tran. II. 1980. V. 76. P. 1354–1370.
12. Taylor R.L. Energy transfer processes in the stratosphere // Can. J. Chem. 1974. V. 52, № 8. P. 1436–1451.
13. Turunen E., Verronen P. T., Seppälä A., Rodger C. J., Clilverd M. A., Tamminen J., Enell C.-F., Ulich T. Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2009. V. 71. № 10–11. P. 1176–1189.

References

1. Kirillov A. S., Belakhovsky V. B. Sveceniye polos molekulyarnogo azota v atmosfere Zemli vo vremya vysypaniya vysokoenergichnykh elektronov [Luminescence of molecular nitrogen bands in the Earth's atmosphere

- during the precipitation of high-energy electrons]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy], 2020a, vol. 60, no. 1, pp. 90–95. (In Russ.).
2. Kirillov A. S., Belakhovsky V. B. Svecheniye polos Laymana-Birdga-Khopfilda N_2 v atmosfere Zemli vo vremya vysypaniya vysokoenergichnykh elektronov [Luminescence of Lyman-Birge-Hopfield bands of N_2 in the Earth's atmosphere during the precipitation of high-energy electrons]. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and aeronomy], 2020b, vol. 60, no. 6, pp. 781–786. (In Russ.).
 3. Funke B., Lopez-Puertas M., Garcia-Comas M., Kaufmann M., Höpfner M., Stiller G.P. GRANADA: A Generic RAdiative traNsfer AnD non-LTE population algorithm. *J. Quan. Spec. Rad. Tran.*, 2012, vol. 113, no. 14, pp. 1771–1817.
 4. Gilmore F.R., Laher R.R., Espy, P.J. Franck-Condon factors, r-centroids, electronic transition moments, and Einstein coefficients for many nitrogen and oxygen band systems. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1992, vol. 21, no. 5, pp. 1005–1107.
 5. Gueguen H., Yazambart F., Chakroun A., Margottin-Maclou M., Doyennette L., Henry L. Temperature dependence of the vibration-vibration transfer rates from CO_2 and N_2O excited in the (0001) vibrational level to $^{14}N_2$ and $^{15}N_2$ molecules. *Chem. Phys. Lett.*, 1975, vol. 35, no. 2, pp. 198–201.
 6. Kirillov A. S. Influence of electronically excited N_2 and O_2 on vibrational kinetics of these molecules in the lower thermosphere and mesosphere during auroral electron precipitation. *J. Atm. Sol. Terr. Phys.*, 2012, vol. 81–82, pp. 9–19.
 7. Kirillov A. S. Intermolecular electron energy transfer processes in the quenching of $N_2(C^3\Pi_u, v=0-4)$ by collisions with N_2 molecules. *Chem. Phys. Lett.*, 2019, vol. 715, pp. 263–267.
 8. Kirillov A. S., Belakhovsky V. B. The kinetics of O_2 singlet electronic states in the upper and middle atmosphere during energetic electron precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2021, vol. 126, e2020JD033177.
 9. Levron D., Phelps A. V. Quenching of $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0,1)$ by N_2 , Ar, and H_2 . *J. Chem. Phys.*, 1978, vol. 69, no. 5, pp. 2260–2262.
 10. Menard J., Doyennette L., Menard-Bourcin F. Vibrational relaxation of ozone in O_3-O_2 and O_3-N_2 gas mixtures from infrared double-resonance measurements in the 200–300 K temperature range. *J. Chem. Phys.*, 1992, vol. 96, no. 8, pp. 5773–5780.
 11. Robertshaw J.S., Smith I.W.M. Vibrational energy transfer from $CO(v=1)$, $N_2(v=1)$, $CO_2(001)$, $N_2O(001)$ and $OCS(001)$ to O_3 . *J. Chem. Soc. Far. Tran. II*, 1980, vol. 76, pp. 1354–1370.
 12. Taylor R.L. Energy transfer processes in the stratosphere. *Can. J. Chem.*, 1974, vol. 52, no. 8, pp. 1436–1451.
 13. Turunen E., Verronen P. T., Seppälä A., Rodger C. J., Clilverd M. A., Tamminen J., Enell C.-F., Ulich T. Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2009, vol. 71, no. 10–11, pp. 1176–1189.

Информация об авторах

А. С. Кириллов — доктор физико-математических наук, зав. лабораторией;

В. Б. Белаховский — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Information about the authors

A. S. Kirillov — doctor of science, head of laboratory;

V. B. Belakhovsky — Ph.D., Senior Researcher.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023; принята к публикации 03.05.2023.
The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023; accepted for publication 03.05.2023.