

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОННО-ВОЗБУЖДЕННОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В СПРАЙТАХ И РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ

А.С. Кириллов¹, В.Ф. Тарасенко^{1,2}, Н.П. Виноградов^{1,2}, В.А. Кириллов^{1,3}

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

²Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

³Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия

Абстракт

Для изучения свойств красных спрайтов разработана модель электронной кинетики молекулярного азота для высот 40-90 км атмосферы Земли в условиях электрического разряда с продолжительностью импульса порядка нескольких микросекунд. Модель включает кинетику триплетных ($A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$) электронно-возбужденных состояний N_2 с учетом переноса энергии возбуждения при неупругих молекулярных столкновениях и спонтанных излучательных переходах. Модель позволяет рассчитывать интенсивности свечения полос первой (излучательные переходы $B^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$) и второй (излучательные переходы $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$) положительных систем N_2 в смеси N_2 - O_2 при электрических разрядах. Результаты моделирования спектров излучения азота в полосах первой и второй положительных систем сравниваются с результатами экспериментальных измерений при давлениях, соответствующих высотам над уровнем моря 40-90 км. Теоретически и экспериментально показано, что неупругие молекулярные столкновения с ростом плотности среды приводят к значительному уменьшению населенностей колебательных уровней состояния $B^3\Pi_g$ и уменьшению интенсивностей свечения полос первой положительной системы N_2 .

Для экспериментальных исследований подготовлена установка на основе разрядных камер из кварцевых трубок. Также созданы генераторы, работающие при различных частотах следования импульсов. На данных установках проведены измерения спектров излучения молекулярного азота в диапазоне 250-1000 нм при давлениях, соответствующих высотам над уровнем моря 40-90 км.

Введение

Молекулярный азот является основной составляющей атмосферы Земли на высотах свечения спрайтов. Неупругое взаимодействие высокоэнергичных электронов в стримерах, формирующих красные спрайты, с молекулами азота приводит к возбуждению различных электронно-возбужденных состояний N_2 . В дальнейшем в возбужденных молекулах азота происходят спонтанные переходы на более низкие по энергии состояния, что служит причиной свечения молекулярного азота в различных диапазонах спектра.

Первая положительная система полос N_2 (1PG) является одной из основных при формировании спектров спрайтов в красном и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн 640–820 нм [Kamrae et al., 2007]. Свечение данной системы полос происходит при спонтанных переходах:



Вторая положительная система полос N_2 (2PG) участвует в формировании спектров спрайтов в синем, фиолетовом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне длин волн 320–460 нм [Heavner et al., 2010]. Свечение 2PG системы полос происходит при спонтанных переходах:



Исследования характеристик оптического излучения во время красных спрайтов проводятся в наземных лабораториях [Franz et al., 1990], с самолетов [Sentman et al., 1995], спутников [Garipov et al., 2013], международной космической станции [Jehl et al., 2013]. Также исследования красных спрайтов проводятся с использованием электромагнитного излучения в КНЧ/ОНЧ-диапазоне [Reising et al., 1996; Дружин и др., 2023].

В данной работе проводится расчет колебательных населенностей триплетных состояний молекулярного азота в воздухе при давлениях, соответствующих высотам 40–90 км свечения красных спрайтов, и измерения спектральной плотности излучения 1PG и 2PG полос N_2 для этого диапазона давлений. Кроме того, экспериментально измеренные спектральные плотности энергии излучения 1PG и 2PG полос в плазменных диффузных струях (ПДС) были использованы для определения отношения спектральных плотностей излучения 1PG полос молекул азота к спектральной плотности излучения 2PG полосы на переходе 0–0 (длина волны 337 нм) и сравнения с результатами теоретических расчетов.

Установка для проведения измерений

Исследования спектров излучения ПДС в воздухе низкого давления, которые являются миниатюрными аналогами красных столбчатых спрайтов, проводились на установке, показанной на рис.1. Подобная установка для изучения свойств аналогов красных спрайтов ранее использовалась в работах [Tarasenko et al., 2022; 2024; Sorokin et al., 2022]. В данных экспериментах импульсы напряжения по высоковольтному кабелю подавались от генератора NPG-15-2000N, разработанного авторами [Korotkov et al., 2012], на электроды 3–4 одинаковой конструкции, которые располагались на внешней поверхности кварцевой трубки 2. Трубка была изготовлена из кварца с высокой прозрачностью в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Расстояние между электродами равнялось 6 см. Амплитуда импульсов напряжения генератора составляла ≈ 12 кВ, длительность импульса на полувысоте 6 нс при фронте и спаде 3 нс.

ПДС, миниатюрные аналоги красных столбчатых спрайтов, формировались в кварцевых трубках при иницилирующем пробое. Фотография разряда в кварцевой трубке, полученная с использованием базовой установки для исследования свойств ПДС показана на рис.2. Пример получаемых спектров излучения при давлении $p=0.4$ Торр приведен на рис.3.

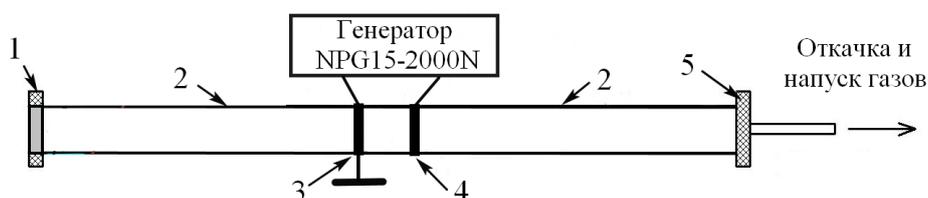


Рисунок 1. Установка для фотографирования разряда и исследований спектров излучения аналогов красных столбчатых спрайтов. 1 – фланец из капролона с торцевым окном из кварца, 2 – кварцевая трубка длиной 200 см с внутренним диаметром 5 см и толщиной стенок 2.5 мм, 3 – заземленный электрод из алюминиевой фольги толщиной 100 мкм и шириной 1 см, 4 – высоковольтный электрод такой же конструкции, 5 – фланец из капролона со штуцером для откачки и впуска воздуха.

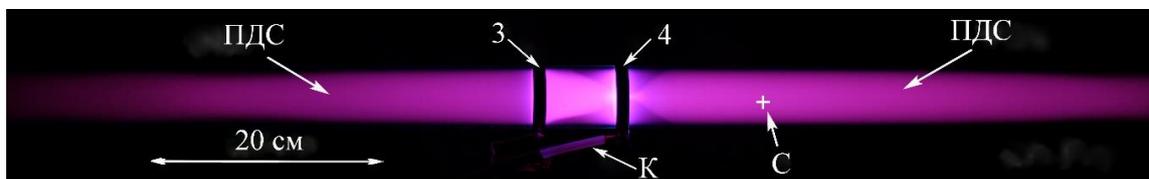
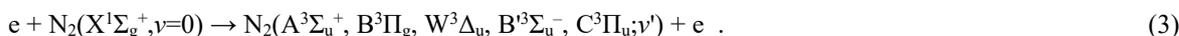


Рисунок 2. Фотографии свечения разряда в кварцевой трубке 2 при экспозиции 1 с и давлении 0.4 торр. 3 – заземленный электрод; 4 – высоковольтный электрод; К – окончание кабеля, соединяющего генератор с электродами; С – место расположения торца световода (11 см от правой кромки электрода 4); ПДС – плазменные диффузные струи, распространяющиеся в обе стороны от области плазмы между электродами.

Спектры излучения регистрировались при различных давлениях воздуха и различных расстояниях от высоковольтного электрода, см. рис.2. Для сравнения экспериментальных и расчётных данных была взята серия измерений, которая включала шесть давлений. В этой серии спектральные плотности энергии излучения были зарегистрированы при давлениях 1, 0.4, 0.1, 0.07, 0.05 и 0.03 торр.

Теоретическая модель

Для исследования свойств спрайтов и лабораторных импульсных разрядов в [Кириллов и др., 2025; Tarasenko и др., 2025] разработана модель кинетических процессов с участием электронно-возбужденных состояний N_2 в смеси газов N_2 и O_2 , созданная на основе модели кинетики молекулярного азота на высотах высокоширотной верхней атмосферы [Kirillov and Belakhovsky, 2019; Кириллов и Белаховский, 2020]. При расчетах скоростей возбуждения различных колебательных уровней пяти триплетных состояний N_2 электронами стримеров разряда учтены следующие процессы электронного возбуждения:



При этом рассмотрены следующие колебательные уровни указанных триплетных состояний: $A^3\Sigma_u^+(v'=0-29)$, $B^3\Pi_g(v'=0-18)$, $W^3\Delta_u(v'=0-21)$, $V^3\Sigma_u^-(v'=0-15)$, $C^3\Pi_u(v'=0-4)$. Поскольку между учитываемыми состояниями происходят излучательные переходы, то кроме спонтанных переходов (1) и (2) с излучением 1PG и 2PG полос,

необходимо ещё учесть излучение полос Ву-Бенеша (переход $W^3\Delta_u, v' \leftrightarrow B^3\Pi_g, v''$) и полос послесвечения (переход $B^3\Sigma_u^-, v' \leftrightarrow B^3\Pi_g, v''$), а также спонтанные переходы $A^3\Sigma_u^+, v' \rightarrow X^1\Sigma_g^+, v''$ (полосы Вегарда-Каплана) [Gilmore et al., 1992].

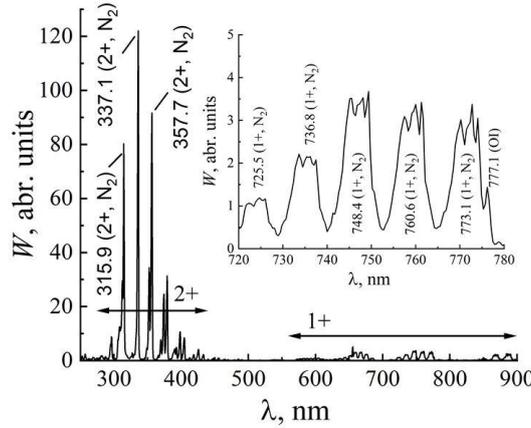
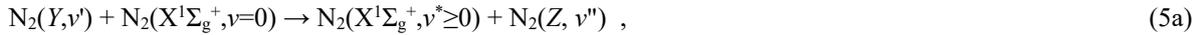


Рисунок 3. Спектр излучения воздуха при давлении $p=0.4$ Торр из области с ПДС. На вставке подробно представлен спектр излучения в инфракрасной области 720–780 нм.

Кроме того, теоретическая модель включает кинетику триплетных ($A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$) состояний N_2 с учетом неупругих столкновительных процессов



где $Y=A^3\Sigma_u^+$, $W^3\Delta_u$, $B^3\Sigma_u^-$ и



где $Y, Z = A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B^3\Sigma_u^-$; N_2^{**} , O_2^{**} обозначают электронно- или колебательно-возбужденные молекулы, причем во время процесса (5б) может произойти возбуждение отталкивательного состояния O_2 с диссоциацией молекулы и образованием двух атомов кислорода. В отличие от высот верхней атмосферы на высотах свечения спрайтов столкновительное время жизни $N_2(C^3\Pi_u)$ молекулы становится сравнимым с излучательным $\tau_c \sim 40$ ns, поэтому необходимо учитывать неупругие столкновения $N_2(C^3\Pi_u)$ с молекулами N_2 и O_2 . В случае столкновений с N_2 константы гашения учитываются согласно [Kirillov, 2019], в случае столкновений с O_2 согласно [Pancheshnyi et al., 2000].

Сравнение экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов

В настоящей работе используя полученные спектры излучения (см. рис.3) были определены отношения спектральных плотностей энергии излучения 1PG полос молекулярного азота W_{1PG} в красном спектральном диапазоне на длинах волн 653, 661, 669, 677 нм и в инфракрасном спектральном диапазоне на длинах волн 737, 748, 761, 773 нм к спектральной плотности энергии излучения W_{2PG} на длине волны 337 нм. Эти отношения также были рассчитаны по теоретической модели, описанной выше. Далее было проведено сравнение экспериментально измеренных и теоретически рассчитанных отношений спектральных плотностей излучения W_{1PG}/W_{2PG} для рассмотренного диапазона давлений. Расчеты проводились для широкого диапазона средних энергий электронов в разрядной плазме $\langle \epsilon \rangle = 2, 3, 4, 6, 8$ и 10 эВ. Результаты такого сравнения для W_{1PG}/W_{2PG} показаны на рис.4 и 5.

Как видно из рис.4 и 5, наблюдается хорошее согласие результатов экспериментальных измерений спектральных характеристик излучения N_2 с результатами теоретических расчетов для рассмотренного интервала давлений воздуха, соответствующего высотам свечения красных спрайтов. Измеренные и рассчитанные отношения спектральных плотностей энергии полос 1PG системы молекулярного азота к полосе 2PG хорошо совпадают при температуре электронов $\approx 3-10$ эВ.

Результаты теоретических расчетов и экспериментальных измерений наглядно демонстрируют уменьшение отношения рассчитанных W_{1PG}/W_{2PG} с увеличением давления (соответственно уменьшением высоты свечения красных спрайтов). Это объясняется ростом скорости гашения состояния $B^3\Pi_g$ (процесс (4б)) с увеличением плотности атмосферы. Для состояния $C^3\Pi_u$ для рассматриваемого интервала давлений, который соответствует высотам свечения на 40–90 км, процессы гашения при неупругих столкновениях с молекулами N_2 и O_2 [Kirillov, 2019; Pancheshnyi et al., 2000] не сильно сказываются на населенностях колебательных уровней $C^3\Pi_u$

из-за малого излучательного времени жизни данного состояния ~ 40 нс [Gilmore et al., 1992]. Поэтому на рис.4 и 5 наблюдается значительное уменьшение значений отношения W_{1PG}/W_{2PG} с ростом давления.

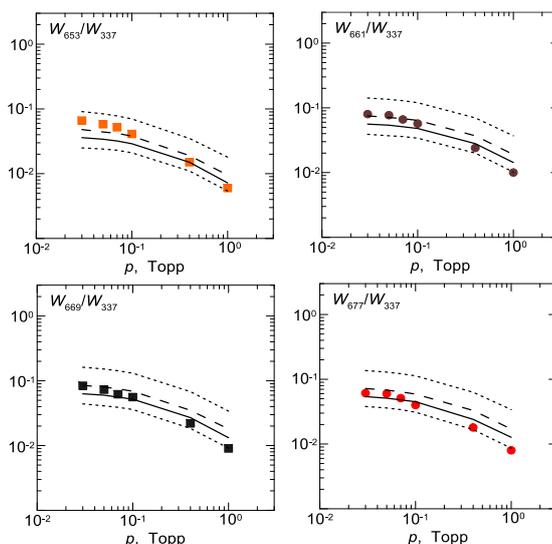


Рисунок 4. Сравнение экспериментально измеренных значений (квадраты, кружки) W_{1PG}/W_{337} (красный диапазон 1PG полос) с результатами расчетов при $\langle \epsilon \rangle = 2, 3, 4, 8$ эВ (верхние точки, штрихи, сплошные линии, нижние точки).

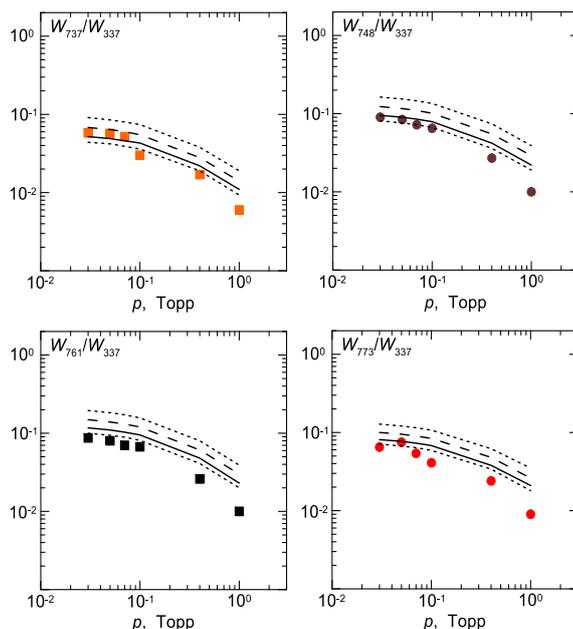


Рисунок 5. Сравнение экспериментально измеренных значений (квадраты, кружки) W_{1PG}/W_{337} (инфракрасный диапазон 1PG полос) с результатами расчетов при $\langle \epsilon \rangle = 3, 4, 6, 10$ эВ (верхние точки, штрихи, сплошные линии, нижние точки).

Заключение

На основе модели электронной кинетики триплетных состояний молекулярного азота проведен расчет населенностей различных колебательных уровней триплетных состояний молекулярного азота при давлениях 0.03-1 Торр (соответствующих высотам 40–90 км свечения красных спрайтов) и спектральных плотностей энергии 1PG и 2PG полос N_2 . Представлены отношения рассчитанных спектральных плотностей энергии W_{1PG}/W_{2PG} для красного и инфракрасного диапазонов спектра 1PG полос для рассмотренного диапазона давлений. Сравнение результатов расчетов с экспериментально измеренными значениями в ПДС показали хорошее согласие.

Благодарности

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 25-22-00158.

Литература

- Дружин Г.И., Малкин Е.И., Капустина О.В. Атмосферика, связанные со спрайтами, по КНЧ/ОНЧ-наблюдениям на п-ове Камчатка // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 63. № 5. С. 657–666. 2023.
- Кириллов А.С., Белаховский В.Б. Свечение полос молекулярного азота в атмосфере Земли во время выпадения высокоэнергичных электронов // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 60. № 1. С. 93–98. 2020. (Kirillov A.S., Belakhovsky V.B. Luminescence of molecular nitrogen bands in the Earth's atmosphere during the precipitation of high-energy electrons // Geomagnetism and Aeronomy. V. 60. N 1. P. 90-95. 2020.)
- Кириллов А.С., Тарасенко В.Ф., Виноградов Н.П., Кириллов В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование кинетики триплетных состояний молекулярного азота в спрайтах и их аналогах // Геомагнетизм и аэрномия. Т.65. № 6. 2025.
- Тарасенко В.Ф., Виноградов Н.П., Бакшт Е.Х., Кириллов А.С., Кириллов В.А. Кинетика полос испускания триплетных состояний молекулярного азота при низких давлениях воздуха // Оптика атмосферы и океана. Т. 38. № 9. С. 768-774. 2025.
- Franz R.C., Nemzek R.J., Winckler J.R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system // Science. V. 249. N 4964. P. 48–51. 1990.
- Garipov G.K., Khrenov B.A., Klimov P.A., Klimenko V.V., Mareev E.A. et al. Global transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of the "Universitetsky-Tatiana-2" satellite // J. Geophys. Res. – Atmos. V. 118. N 2. P. 370–379. 2013.
- 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. V. 21. N 5. P. 1005–1107. 1992.
- Heavner M.J., Morrill J.S., Siefring C., Sentman D.D., Moudry D.R. et al. Near-ultraviolet and blue spectral observations of sprites in the 320–460 nm region: N₂ (2PG) emissions // J. Geophys. Res. – Space. V. 115. N 7. ID A00E44. 2010.
- Jehl A., Farges T., Blanc E. Color pictures of sprites from nondedicated observation on board the International Space Station // J. Geophys. Res. – Space. V. 118. N 1. P. 454–461. 2013.
- Kanmae T., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G. Altitude resolved sprite spectra with 3 ms temporal resolution // Geophys. Res. Lett. V. 34. N 7. ID L07810. 2007.
- Kirillov A.S. Intermolecular electron energy transfer processes in the quenching of N₂(C³Π_u,v=0-4) by collisions with N₂ molecules // Chem. Phys. Lett. V. 715. P. 263–267. 2019.
- Kirillov A.S., Belakhovsky V.B. The kinetics of N₂ triplet electronic states in the upper and middle atmosphere during relativistic electron precipitations // Geophys. Res. Lett. V. 46. N 13. P. 7734–7743. 2019.
- Korotkov S.V., Aristov Y.V., Kozlov A.K., Korotkov D.A., Lyublinsky A.G., Spichkin G.L. Installation for air cleaning from organic impurities by plasma formed by barrier discharge of nanosecond duration // Instrum. Exp. Tech. V. 55. N 5. P. 605–607. 2012.
- Pancheshnyi S.V., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu. Collisional deactivation of N₂(C³Π_u,v=0,1,2,3) states by N₂, O₂, H₂ and H₂O molecules // Chem. Phys. V. 262. N 2–3. P. 349–357. 2000.
- Reising S.C., Inan U.S., Bell T.F., Lyons W.A. Evidence for continuing current in sprite-producing cloud-to-ground lightning // Geophys. Res. Lett. V. 23. N 24. P. 3639–3642. 1996.
- Sentman D.D., Wescott E.M., Osborne D.L., Hampton D.L., Heavner M.J. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red sprites // Geophys. Res. Lett. V. 22. N 10. P. 1205–1208. 1995.
- Sorokin D., Tarasenko V., Baksht E.Kh., Vinogradov N.P. Ionization waves, propagating in opposite directions, as in red sprites // European Journal of Environment and Earth Sciences. V. 3. N 6. P. 42–48. 2022.
- Tarasenko V., Vinogradov N., Baksht E., Sorokin D. Experimental simulation of red sprites in a laboratory // Journal of Atmospheric Science Research. V. 5. N 3. P. 26–36. 2022.
- Tarasenko V.F., Vinogradov N.P., Panarin V.A., Skakun V.S., Sorokin D.A., Baksht E.Kh. Experimental simulation of non-uniformity in columnar sprite glow // Atmospheric and Oceanic Optics. V. 37. Suppl. 1. P. S183–S191. 2024.