

Секция Р

ПЛЕНАРНАЯ СЕКЦИЯ

УДК 533.951

Моделирование спектров излучения красных спрайтов при использовании их аналогов и программы, определяющей спектры электронно-возбужденных состояний N_2 и N_2^+

А.С. Кириллов¹, В.Ф. Тарасенко^{1,2}¹ Полярный геофизический институт

184209, Анапиты, Россия, Академгородок, 26А, kirillov@pgia.ru

² Институт сильноточной электроники СО РАН

634055, Томск, Россия, Академическая ул., 2/3, VFT@loi.hcei.tsc.ru

Предложено получать информацию о спектрах излучения красных спрайтов в широком спектральном диапазоне и при высоком разрешении, используя их лабораторные аналоги. При этом, тестирование получаемых спектров проводится с помощью модели кинетических процессов с участием электронно-возбужденных состояний N_2 и N_2^+ в смеси газов N_2 и O_2 . Проводится сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных отношений спектральных плотностей излучения полос красного диапазона спектра свечения молекулярного азота к плотностям излучения ультрафиолетовых полос N_2 и N_2^+ при давлениях среды 0,03–1 Торр.

Ключевые слова: красные спрайты, спектры излучения, теоретическое и экспериментальное моделирование; red sprites, emission spectra, theoretical and experimental modeling.

Введение

Благодаря многочисленным исследованиям разрядов в мезосфере и стратосфере, накоплены значительные сведения об их форме и природе [1, 2]. Однако определение спектров излучения красных спрайтов, которые наиболее изучены в настоящее время, является сложной задачей [3]. В-первых, эти разряды наблюдаются только над грозовыми облаками на высотах над уровнем моря 40–100 км. Соответственно, их можно наблюдать с Земли в горах или на больших расстояниях от места их появления. Другой вариант – проводить измерения с самолётов, спутников, аэростатов и Международной космической станции. Все эти измерения требуют больших материальных затрат. Во-вторых, хотя спрайты появляются над грозовыми облаками во время положительных молний, время этих разрядов и их место, а также форма нестабильны и изменяются от импульса к импульсу. В настоящее время удается регистрировать спектры излучения спрайтов, для их различных частей (стримеров, как распространяющихся вниз к поверхности Земли, так и вверх; областей яркого свечения glow; отдельных ярких точек beads, но только с малым спектральным и временным разрешением, а также в ограниченных спектральных диапазонах [3].

Цель настоящей работы – получить подробную информацию о предполагаемых спектрах излучения красных спрайтов, используя их лабораторные аналоги [4, 5]. При этом тестирование получаемых спектров проводилось с помощью модели кинетических процессов с участием электронно-возбужденных молекул N_2 и N_2^+ , созданной на основе модели кинетики молекулярного азота на высотах высокоширотной верхней атмосферы во время высыпания высокоэнергичных электронов [6, 7].

Экспериментальная установка и методики измерений

Для изучения спектров излучения аналогов красных спрайтов, а также других их характеристик, можно применять различные установки, часть из них описаны в работах [4, 5]. Это позволяет изменять условия возбуждения и получать аналоги столбчатых красных спрайтов, формируемых за счет положительных стримеров; морковных красных спрайтов, формируемых при участии отрицательных стримеров; областей glow и точек beads, регистрируя спектры излучения в видимой, УФ-, ВУФ- и ближней ИК-областях спектра.

Например, использовать для получения спектров излучения плазменных диффузных струй (ПДС) в ВУФ-области спектра установку, фотография которой показана на рис. 1, а, см. также работу [5].

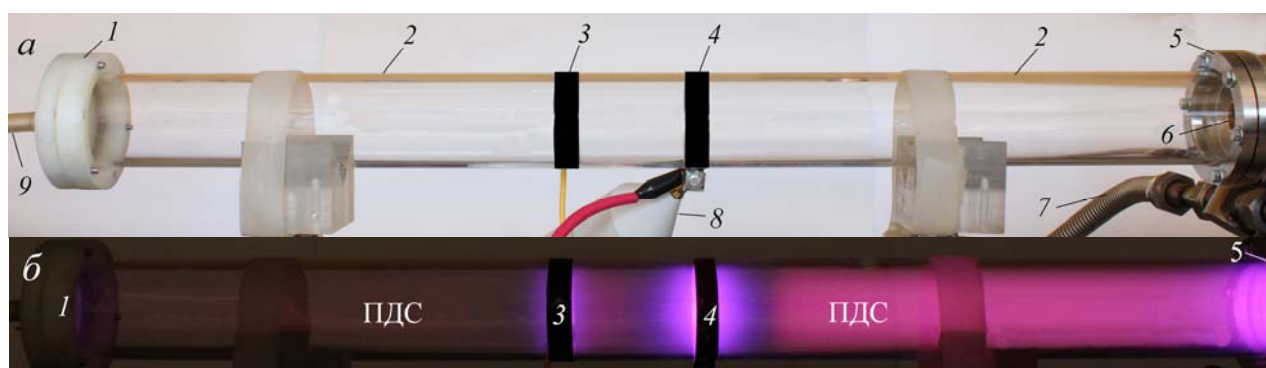


Рис. 1. Фотографии установки для получения ПДС (а) и излучения разряда при отрицательной полярности генератора G2 и давлении воздуха $p = 0,3$ Торг (б). 1 – левый торцевой фланец из капролона, 2 – кварцевая трубка, 3 – заземленный электрод, 4 – высоковольтный электрод, 5 – торец переходной камеры для подсоединения к монохроматору, 6 – окно из MgF_2 , 7 – шланг для откачки переходной камеры, 8 – делитель напряжения, 9 – штуцер для откачки и напуска газов в трубку 2. Частота следования импульсов напряжения $f = 2$ kHz

Разряд формировался в трубке 2 с внутренним диаметром 5 см при подключении к кольцевым внешним электродам 3, 4 высоковольтного генератора с амплитудой импульсов напряжения холостого хода $U \sim 10$ кВ. В импульсно-периодическом режиме ($f = 1$ кГц и более) при длительности импульса напряжения на полувысоте $\sim 1,5$ мкс U уменьшалось до ~ 7 кВ. Длительности фронта и спада U были одинаковы и при формировании плазменной диффузной струи (ПДС) равнялись ~ 350 нс. Пример формы разряда в виде ПДС показан на рис. 1, б.

Эмиссионные спектры излучения разрядной плазмы в области 120–550 нм регистрировались при помощи вакуумного монохроматора VM-502 (Acton Research Corp.). Для регистрации спектров излучения через боковую поверхность кварцевой трубки использовались спектрометры HR2000+ES и HR4000 (оба производства OceanOptics Inc.), оснащенные световодом. Чувствительности спектрометров и пропускание световода в диапазоне $\Delta\lambda = 250$ –1000 нм были известны. Спектральное разрешение оптической системы с монохроматором VM-502 было не хуже $\sim 0,4$ нм при ширине входной щели 100 мкм, а со спектрометрами HR2000+ES и HR4000 не хуже $\sim 0,9$ и $\sim 0,2$ нм, соответственно. Регистрация спектров излучения, а также фотографирование свечения разрядной плазмы проводились в темноте. Подробно работа данной установки и методики измерений, а также конструкции других установок, используемых для изучения спектров излучения, описаны в работах [4, 5].

Для сравнения с результатами расчетов спектры излучения были зарегистрированы в области ПДС для шести давлений воздуха (1; 0,4; 0,1; 0,07; 0,05 и 0,03 Торг). Мы измеряли спектральные плотности энергии излучения при этих давлениях для полос 1+ системы молекулы азота с длинами волн 645, 653, 661, 669, 677 и 686 нм, а также для полос 2+ системы молекулы азота с длинами волн 316, 337 и 358 нм. Из этих данных были получены отношения W шести полос 1+ к W трех полос 2+.

Теоретическая модель

Для исследования свойств спрайтов и лабораторных импульсных разрядов разработана модель кинетических процессов с участием электронно-возбужденных состояний N_2 и N_2^+ в смеси газов N_2 и O_2 , созданная на основе модели кинетики молекулярного азота на высотах высокоширотной верхней атмосферы [6, 7]. 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 и дублетного $B^2\Sigma_u^+$ состояния N_2^+ с учетом переноса энергии возбуждения при неупругих молекулярных столкновениях и спонтанных излучательных переходах. Для молекулярных столкновений учитываются квантовые выходы различных состояний в результате неупругих взаимодействий, рассчитанные теоретическими приближениями (Ландау-Зинера и Розена-Зинера). Модель позволяет рассчитывать интенсивности свечения полос первой (1+) и второй (2+) положительных систем молекулярного азота

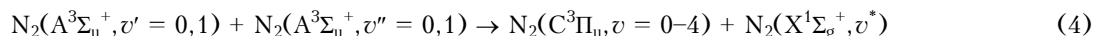


и первой отрицательной (1–) системы



в смеси N_2 и O_2 газов при электрических разрядах.

Используя теоретические приближения, впервые был проведен расчет констант скоростей процессов взаимодействия двух метастабильных молекул азота



с образованием электронно-возбужденной молекулы $\text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u)$. Также было проведено сравнение результатов расчета констант процесса (4) с экспериментальными данными [8]. Аналогичные расчеты констант скоростей проведены для процессов (4) с участием молекул $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+, v > 1)$. Показано, что подобные процессы с участием молекул $\text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+, v > 1)$ важны при уменьшении относительного содержания молекулярного кислорода в смеси N_2 и O_2 .

Результаты и их обсуждение

Результаты моделирования спектров излучения N_2 и N_2^+ в полосах 1+, 2+, 1– систем сравнивались с результатами экспериментальных измерений при давлениях, соответствующим высотам над уровнем моря 40-90 км. Спектры излучения были зарегистрированы для шести давлений воздуха (1; 0,4; 0,1; 0,07; 0,05 и 0,03 Торр). Далее мы измеряли спектральные плотности энергии излучения W при этих давлениях для полос 1+ системы молекулы азота с длинами волн 645, 653, 661, 669, 677 и 686 нм (прогрессия $\Delta v = v' - v'' = 3$ в (1)), а также для полос 2+ системы молекулы азота с длинами волн 316, 337 и 358 нм (переходы $v' = 1 \rightarrow v'' = 0$, $0 \rightarrow 0$, $0 \rightarrow 1$ в (2)). Из этих данных были получены отношения W шести 1+ полос к W трех 2+ полос, которые сравнивались с результатами расчетов. Пример спектра излучения воздуха при давлении 0,4 Торр, одного из шести исследованных, показан на рис. 2.

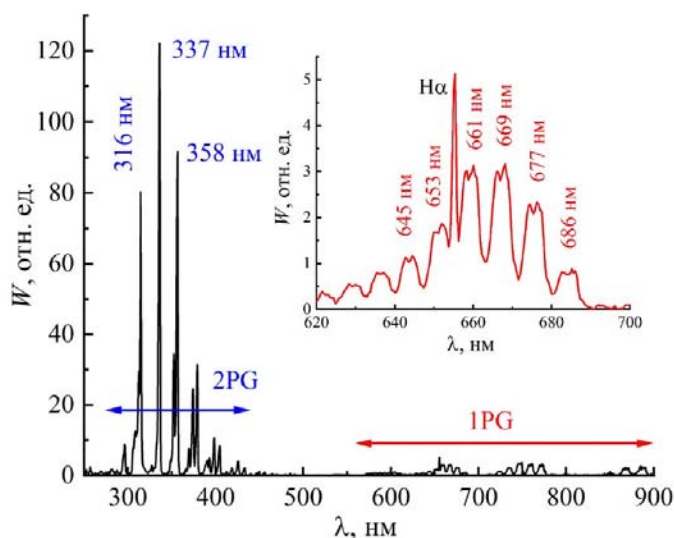


Рис. 2. Спектр излучения воздуха при давлении 0,4 Торр из области плазменной диффузной струи шириной 1 см, расположенной на расстоянии 11 см от правого края электрода 4. Экспозиция 5 с

На рис. 2 видно, что основной вклад в спектральную плотность энергии излучения W , дают полосы 2+ и 1+ систем молекулы азота. Причем, пиковые значения W у ультрафиолетовых 2+ полос выше, однако видимый красный цвет ПДС определяют 1+ полосы. С уменьшением давления в спектре излучения появляется линия атомарного водорода $\text{H}\alpha$, которая обусловлена наличием в воздухе паров воды. Отметим, что в излучении красных спрайтов также регистрировалось излучение в УФ-, видимой и ИК-областях спектра [3, 9].

Используя полученные данные, было проведено сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных отношений спектральных плотностей излучения W_{1+}/W_{2+} и W_{1+}/W_{1-} для рассмотренного диапазона давлений. Пример такого расчёта показан для W_{1+}/W_{337} на рис. 3.

Расчеты были проведены для энергий электронов разряда $\langle \epsilon \rangle = 2, 3, 4$ и 8 эВ. Согласно экспериментальным измерениям и теоретическим расчетам наблюдается уменьшение отношения W_{1+}/W_{337} с ростом давления. Связано это с тем, что неупругие молекулярные столкновения с ростом плотности среды приводят к значительному уменьшению населенностей различных колебательных уровней состояния $\text{B}^3\Pi_g$ и уменьшению интенсивностей свечения полос 1+ системы молекулярного азота N_2 .

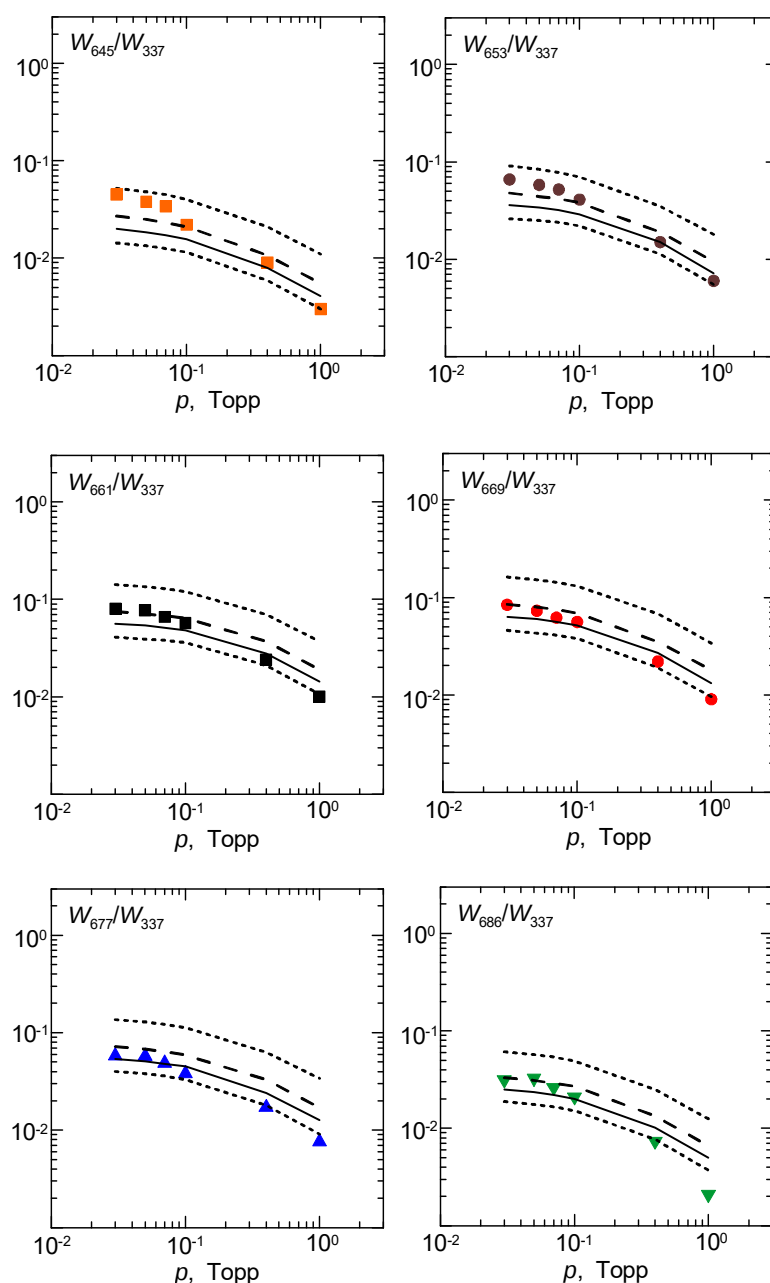


Рис. 3. Сравнение экспериментально измеренных значений (квадраты, кружки, треугольники) W_{1+}/W_{337} с результатами расчетов при $\langle \epsilon \rangle = 2, 3, 4$ и 8 эВ (верхние точки, штрихи, сплошные линии, нижние точки)

Как видно из рис. 3, наблюдается хорошее согласие результатов экспериментальных измерений и расчетов. Это позволяет предположить, что спектры излучения, которые регистрируются для аналогов красных спрайтов в работах [4, 5] и других наших публикациях, а также в данной работе, позволяют предсказывать спектры излучения в различных областях красных спрайтов и их изменение при вариации условий формирования высотных разрядов.

Заключение

Проведено сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных отношений спектральных плотностей излучения W_{1+}/W_{2+} и W_{1+}/W_{1-} для рассмотренного диапазона давлений $0,03\text{--}1$ Торр. Теоретические расчеты и экспериментальные измерения спектров излучения разрядов (аналогов красных спрайтов) показали, что неупругие молекулярные столкновения с ростом плотности среды приводят к значительному уменьшению населенностей различных колебательных уровней состояния $\text{B}^3\Pi_g$ и уменьшению интенсивностей свечения полос $1+$ системы молекулярного азота N_2 . Установлено, что рассмотренные отношения сильно зависят от давления, а также могут быть использованы для оценки температуры электронов разряда. Предлагается получать предварительную информацию в широком спектральном диапазоне и при высоком разрешении о спектрах излучения красных спрайтов, используя их лабораторные аналоги.

Благодарности. Авторы благодарят Н.П. Виноградова, Е.Х. Бакшта, В.А. Кириллова, А.Н. Панченко и Д.А. Сорокина за помощь в проведении работы.

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

Список литературы

1. Williams E., Valente M., Gerken E., Golka R. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges / Springer, Dordrecht. 2006. P. 237–251.
2. Marškar R. Genesis of column sprites: formation mechanisms and optical structures // Plasma Sources Science and Technology. 2024. V. 33, N 025024. DOI: 10.48550/arXiv.2310.08254.
3. Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Haaland R., Luque A. Optical spectra of small-scale sprite features observed at 10,000 fps // J. of Geophysical Research: Atmospheres. 2020. V. 125, N e2020JD033170. DOI: 10.1029/2020JD033170.
4. Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Baksht E.K., Vinogradov N.P. Analogs of columnar sprites initiated in low-pressure air and nitrogen // Physics of Plasmas. 2023. V. 30, N 083515. DOI: 10.1063/5.0153509.
5. Тарасенко В.Ф., Панченко А.Н., Бакшт Е.Х., Виноградов Н.П. Излучение плазменных диффузных струй в диапазоне длин волн 120 – 1000 нм при давлениях воздуха 0,2–1,5 Торр // Оптика и спектроскопия. 2025. Т. 133, В. 1. С. 5–13. DOI: 10.61011/OS.2025.01.59873.7284-24.
6. Kirillov A.S. Electronically excited molecular nitrogen and molecular oxygen in the high-latitude upper atmosphere // Ann. Geophys. 2008. V. 26, N 5. P. 1159–1169. DOI: 10.5194/angeo-26-1159-2008.
7. Kirillov A.S., Belakhovsky V.B. The kinetics of N₂ triplet electronic states in the upper and middle atmosphere during relativistic electron precipitation. // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 46. P. 7734–7743. DOI: 10.1029/2019GL083135.
8. Piper L.G. State-to-state N₂(A³Σ_u⁺) energy-pooling reactions. I. The formation of N₂(C³Π_u) and the Herman infrared system // J. Chem. Phys. 1988. V. 88, N 1. P. 231–239. DOI: 10.1063/1.454649.
9. Siefring C.L., Morrill J.S., Sentman D.D., Heavner M.J. Simultaneous near-infrared and visible observations of sprites and acoustic-gravity waves during the EXL98 campaign // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, N A00E57. DOI: 10.1029/2009JA014862.

A.S. Kirillov, V.F. Tarasenko. Modeling of red sprite emission spectra using their analogs and a program determining the spectra of electronically excited states of N₂ and N₂⁺.

It is proposed to obtain information on the emission spectra of red sprites in a wide spectral range and at high resolution using their laboratory analogs. In this case, the obtained spectra are tested using a model of kinetic processes taking into account electronically excited states of N₂ and N₂⁺ in a mixture of N₂ and O₂ gases. Theoretically calculated and experimentally measured ratios of spectral densities of emission of the red range bands of molecular nitrogen to spectral densities of the ultraviolet bands of N₂ and N₂⁺ are compared at pressures of 0.03–1 Torr.