

01

## Излучение плазменных диффузных струй в диапазоне длин волн 120–1000 nm при давлениях воздуха 0.2–1.5 Torr

© В.Ф. Тарасенко, А.Н. Панченко, Е.Х. Бакшт, Н.П. Виноградов

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, Томск, Россия

e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 01.11.2024 г.

В окончательной редакции 24.12.2024 г.

Принята к публикации 22.01.2025 г.

Исследованы спектральные свойства плазмы плазменных диффузных струй (ПДС), которые являются аналогами столбчатых спрайтов. Плазменные диффузные струи формировались с помощью импульсно-периодического барьерного разряда в кварцевых трубках различной длины при давлениях 0.2–2 Torr в воздухе и азоте. В спектральном диапазоне от 120 до 1000 nm были получены данные об относительной спектральной плотности энергии излучения на трех полосах молекулы азота и одной полосе молекулярного иона азота как с торца кварцевой трубки, так и с ее боковой поверхности. Установлено, что в спектрах излучения ПДС, регистрируемых с торца трубки и ее боковой поверхности у электродов, соотношение интенсивностей полос второй положительной (2+) и первой отрицательной (1-) систем азота изменяется в пользу 1- системы. Зарегистрировано излучение в вакуумной ультрафиолетовой области спектра на полосе  $a^1\Pi_g - X^1\Sigma_g^+$  молекул азота и на линиях атомарного азота, интенсивность которых возрастала при уменьшении давления воздуха. Подтверждено, что в ПДС спектральная плотность энергии излучения  $W$  наиболее интенсивных полос 2+ системы молекулярного азота существенно превышает  $W$  полос 1+ системы азота.

**Ключевые слова:** плазменные диффузные струи, воздух, азот, низкое давление, спектры излучения, ВУФ линии и полосы, соотношение интенсивностей.

DOI: 10.61011/OS.2025.01.59873.7284-24

### Введение

В настоящее время продолжают исследования электрических разрядов в стратосфере и мезосфере, которые получили название „транзитные световые явления“ (ТСЯ) [1,2]. В частности, подробно изучаются спектры излучения различных типов разрядов, таких как красные спрайты (особый вид молнии, возникающий в верхних слоях атмосферы Земли в сильную грозу на больших высотах), голубые струи, эльфы, гало и другие, более редкие виды разрядов [3,4]. Исследования проводятся как из лабораторий на поверхности Земли [5], так и с помощью летающих лабораторий, базирующихся на самолетах [6]. Кроме того, спектральные приборы устанавливаются на спутниках [7] и Международной космической станции [8]. Наибольшее внимание уделяется изучению столбчатых красных спрайтов, фотографии которых, а также спектры их излучения можно найти в многих работах [9–11]. Красные спрайты наблюдаются на высотах над уровнем моря от 40 до 100 km. Столбчатые спрайты возникают на высоте около 85 km и имеют наиболее простое строение [1–4]. Их длина превышает 10 km и они могут изменять форму и цвет при распространении к поверхности Земли [11]. К настоящему времени установлено, что образование столбчатых спрайтов происходит во время грозных разрядов за счет стримеров, которые обычно инициируются у нижней части гало. Спрайты формируются

преимущественно при возникновении положительных молний между облаком и Землей. Стример (движущая область ионизации газа, создаваемая на фронте плотной плазмы высоким электрическим полем), инициирующий основной канал спрайта, распространяясь вниз, может создавать яркую область (glow), а ниже ее светящиеся точки (beads). Далее он может делиться на несколько стримеров с меньшим диаметром каналов. Установлено, что в излучении красных спрайтов наибольшую интенсивность имеет область glow, которая находится в верхней части спрайта [3].

В настоящее время однозначно установлено [1–3,11], что красный цвет спрайтов обусловлен излучением полос первой положительной системы (1+) молекул азота. Голубой оттенок в излучении нижней части спрайтов на высоте менее 50 km над уровнем моря придают полосы первой отрицательной системы (1-) молекулярного иона азота и второй положительной системы (2+) молекул азота [3,6,12]. Изменения спектров излучения красных спрайтов обычно наблюдаются в областях при изменении их формы. Так, в работе [12] было показано, что с уменьшением высоты от 60 до 50 km отношение интенсивностей полосы с длиной волны 427.8 nm (1-) к полосе с длиной волны 337.1 nm (2+) увеличивается. Однако в настоящее время отсутствуют или очень мало экспериментальных данных об отношении интенсивностей излучения в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ), ультрафиолетовой (УФ), видимой и ближней инфра-

красной (ИК) областях спектра, полученных с высоким спектральным разрешением для столбчатых красных спрайтов и других ТСЯ. Одной из причин является значительное поглощение атмосферных газов [13], а также облаков и аэрозолей. Это существенно затрудняет регистрацию спектров излучения природных разрядов.

Из теоретического моделирования следует [11,14], что при возбуждении воздуха в квазистатическом электрическом поле в излучении красных спрайтов должно присутствовать не менее пяти полос молекулярного азота в области 120–1000 nm. В работе [14] приведены синтетические спектры для систем полос 1+, 2+, 1-, Лаймана–Бирджа–Хопфилда (ЛБХ) и Менделя на переходах  $N_2^+$ , а также рассчитаны яркости излучения при четырех приведенных напряженностях электрического поля ( $E/N = 20, 100, 200$  и  $400$  Td, где  $E$  — напряженность электрического поля,  $N$  — концентрация частиц). Предполагается, что полученные данные будут полезны при измерении вложенной энергии в красных спрайтах.

В работе [15] приведены расчетные данные по интенсивности люминесценции полос ЛБХ, а также полосы 2+ системы азота при возбуждении воздуха пучком электронов с энергией от 10 keV до 10 MeV. Установлено, что с ростом энергии электронов увеличивается вклад тушения состояния  $a^1\Pi_g$  при молекулярных столкновениях. Это приводит к уменьшению отношения интегральных интенсивностей люминесценции полос ЛБХ и второй положительной системы при увеличении энергии электронов.

Параллельно с натурными измерениями спектров излучения в красных спрайтах и теоретическими расчетами проводилось экспериментальное моделирование их аналогов в лабораториях [16–18]. Однако в этих работах создаваемая плазма контактировала с металлическими электродами, и полоса ЛБХ не регистрировалась.

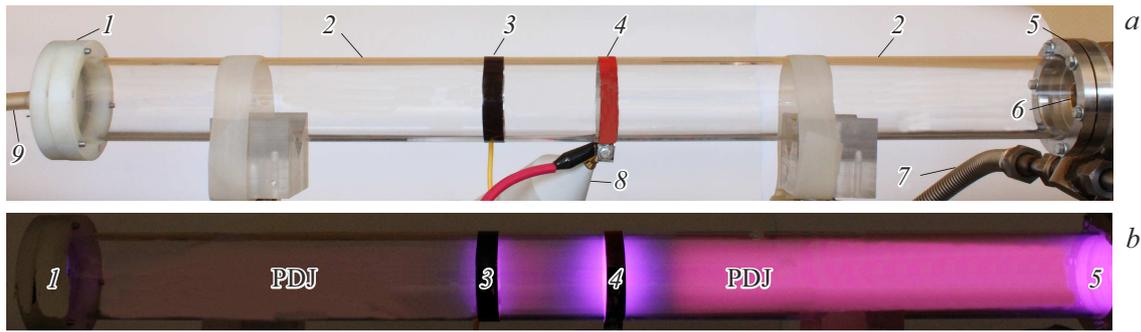
Наиболее близко к реальным свойства столбчатых красных спрайтов были воспроизведены в работах [19–22], в которых с помощью импульсно-периодического барьерного разряда были созданы плазменные диффузные струи (ПДС) красного цвета длиной более одного метра. Было показано, что ПДС инициируются из плазмы, не имеющей контакта с металлическими электродами за счет как положительных, так и отрицательных стримеров [22]. Также было установлено, что красный цвет разряда, наблюдаемый визуально и полученный при фотографировании стандартными цифровыми аппаратами, регистрируется при спектральной плотности энергии излучения наиболее интенсивных полос 1+ системы азота на 2 порядка меньшей, чем у полос 2+ системы азота [19–21]. Эксперименты в [19–22] проводились при высокой частоте импульсов. Это позволяло, по-видимому, за счет осевого сжатия плазмы поверхностным зарядом получать ПДС цилиндрической формы метровой длины при низких напряжениях. Заряды накапливались на внутренней стенке кварцевой трубки за счет работы в импульсно-периодическом режиме и стабилизировали поперечные размеры ПДС. Кроме того,

на диаметр ПДС в импульсно-периодическом режиме оказывает нагрев газа. Однако в этих работах спектральные исследования в ВУФ диапазоне длин волн не проводились, и интенсивность излучения полосы ЛБХ молекулы азота не сравнивалось с другими полосами.

Цель настоящей работы – исследовать спектры излучения ПДС (являющихся миниатюрными аналогами красных спрайтов) в диапазоне 120–1000 nm, и получить информацию о соотношении интенсивностей молекулярных полос азота в различных диапазонах длин волн, в том числе зарегистрировать ВУФ излучение полос ЛБХ.

## Экспериментальная установка и методики измерений

Для получения спектров излучения ПДС в ВУФ области спектра была создана установка, фотография которой показана на рис. 1, а. Разряд формировался в трубке 2 при подключении к кольцевым внешним электродам 3, 4 высоковольтного генератора с амплитудой импульсов напряжения холостого хода  $U \sim 10$  kV. В импульсно-периодическом режиме ( $f = 1$  kHz и более) при длительности импульса напряжения на полувысоте  $\sim 1.5 \mu s$   $U$  уменьшалось до  $\sim 7$  kV. Длительности фронта и спада  $U$  были одинаковы и при формировании ПДС равнялись  $\sim 350$  ns. Высоковольтным мог быть как электрод 4, так и электрод 3, которые изготавливались из алюминиевой фольги толщиной 100  $\mu m$ . Ширина этих электродов составляла 1 см. Генератор формировал импульсы высокого напряжения как отрицательной, так и положительной полярности. Спектры излучения обычно записывались при частоте следования импульсов 2 kHz. Разрядная трубка была изготовлена из кварцевого стекла марки GE-214, имеющего высокий коэффициент пропускания в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра. Длина трубки, ее внутренний диаметр и толщина стенок составляли соответственно 64 см, 5 см и 2.5 мм. Ось трубки располагалась на расстоянии 18 см от плоской металлической поверхности экспериментального стенда. Для получения спектров излучения в ВУФ области правый (относительно читателя) торец трубки 2 подсоединялся к переходной камере из нержавеющей стали 5 с окном 6 из  $MgF_2$ . Переходная камера была заземлена и обеспечивала подсоединение к монохроматору, на входную щель которого излучение поступало из осевой части разряда. Левый торец кварцевой трубки закрывался фланцем 1 из диэлектрика со штуцером 9, через который осуществлялась откачка трубки и напуск в нее воздуха из лабораторного помещения. В ряде экспериментов вместо воздуха использовался азот высокой чистоты. При получении данных для каждого набора условий трубка откачивалась форвакуумным насосом до  $p = 10^{-2}$  Torr, а затем наполнялась воздухом или азотом до нужного давления. Относительная влажность



**Рис. 1.** Фотографии установки для получения ПДС (PDJ) (а) и излучения разряда при отрицательной полярности генератора и давлении воздуха  $p = 0.3 \text{ Torr}$  (b). 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  $\text{MgF}_2$ , 7 — шланг для откачки переходной камеры, 8 — делитель напряжения, 9 — штуцер для откачки и напуска газов в трубку 2. Частота следования импульсов напряжения  $f = 2 \text{ kHz}$ .

воздуха в комнате перед его напуском в трубку составляла  $\sim 23\%$  при температуре  $22^\circ\text{C}$ .

Эмиссионные спектры излучения разрядной плазмы в области  $120\text{--}550 \text{ nm}$  регистрировались при помощи вакуумного монохроматора VM-502 (Acton Researcher Corp.). Временные характеристики излучения в отдельных спектральных диапазонах определялись с помощью ФЭУ монохроматора (EMI 9781 B) с временным разрешением  $\sim 3 \text{ ns}$  для фронта сигнала и  $\sim 30 \text{ ns}$  для его спада. 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  $\Delta\lambda = 250\text{--}1000 \text{ nm}$  были известны. Спектральное разрешение оптической системы с монохроматором VM-502 было не хуже  $\sim 0.4 \text{ nm}$  при ширине входной щели  $100 \mu\text{m}$ , а со спектрометрами HR2000+ES и HR4000 не хуже  $\sim 0.9$  и  $\sim 0.2 \text{ nm}$  соответственно. Съемка интегрального свечения плазмы разряда осуществлялась цифровым фотоаппаратом Canon 2000D (CANON). Регистрация спектров излучения, а также фотографирование свечения разрядной плазмы проводились в темноте.

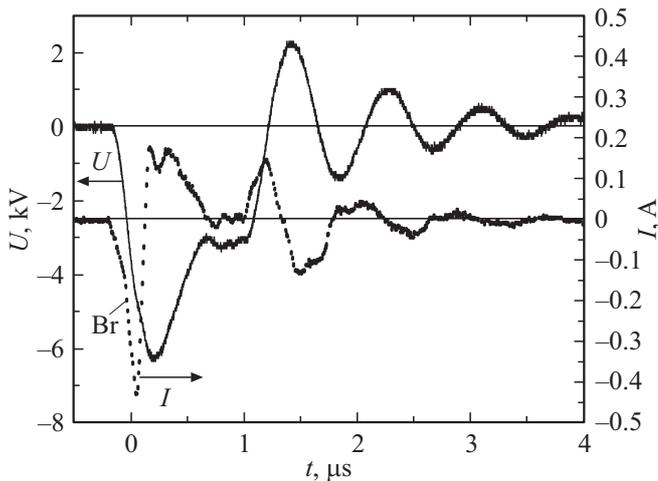
Напряжение на разрядном промежутке измерялось посредством высоковольтного пробника TT-HVP 2739 с полосой пропускания  $220 \text{ MHz}$  (8), а ток разряда — с помощью шунта на основе резисторов марки TBO, имеющего сопротивление  $0.1 \Omega$ . Сигналы с делителя напряжения и токового шунта регистрировались цифровым осциллографом Tektronix MDO 3104 ( $1 \text{ GHz}$ ,  $5 \text{ GS/s}$ ).

## Результаты измерений

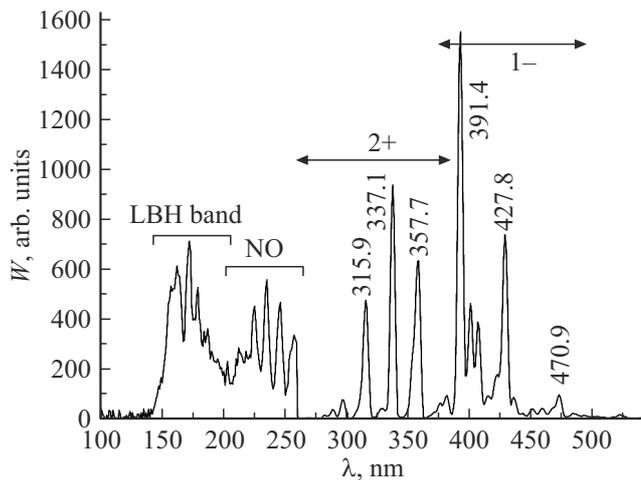
Фотография интегрального свечения разряда в воздухе при давлении  $0.3 \text{ Torr}$  приведена на рис. 1, b. Плазменные диффузные струи, как и в работах [19,21,22], распространяются в обе стороны от плазмы емкостного разряда между электродами 3, 4. Их появление прак-

тически не зависит от полярности и места положения высоковольтного электрода (слева или справа). Однако на их яркость и форму существенное влияние оказывают давление газа, расстояние до торцов кварцевой трубки и материал фланцев, а также наличие заземления у фланца из металла и индуктивность этого заземления. В опытах с вакуумным монохроматором большую яркость имела ПДС (на рис. 1, b она обозначена как PDJ), которая распространялась по направлению к переходной камере 5. Это обусловлено увеличением тока разряда в этой цепи после прохождения фронта стримера, который формировал ПДС, за счет заземления переходной камеры 5. Распространение стримеров в ПДС подробно описано в работах [21,22]. Следует отметить, что свечение ПДС сравнительно однородно по длине, как и свечение большинства столбчатых спрайтов. Давление воздуха и длина кварцевой трубки для условий на рис. 1, b были выбраны относительно малыми и ПДС достигали обоих торцов, а их диаметр в этих условиях был равен внутреннему диаметру кварцевой трубки. Однако, как уже отмечалось, интенсивность излучения разрядной плазмы между электродом 4 и переходной камерой 5 была благодаря заземлению камеры существенно больше.

Интенсивность свечения плазмы разряда у высоковольтного электрода 4 была выше (рис. 1, b), чем у заземленного электрода 3. При изменении места подключения высоковольтного вывода генератора от электрода 4 к электроду 3 интенсивность излучения у электрода 3 увеличивалась, а у электрода 4 уменьшалась. Также отметим, что между ярким свечением у электрода 4 и правой ПДС, а также с его левой стороны между электродами 3 и 4 области свечения разряда имеют меньшую интенсивность излучения. Кроме того, цвет разряда между темной областью и электродом имеет голубой оттенок. Было установлено, что в данных областях цвет разряда обусловлен величиной приведенного электрического поля. Изменение приведенного электрического поля было определено по спектрам излучения этих областей, в которых измерялось отношение



**Рис. 2.** Осциллограммы импульсов напряжения  $U$  между кольцевыми электродами и тока разряда  $I$  в цепи заземления генератора при давлении воздуха 0.6 Торр и  $f = 2$  kHz.



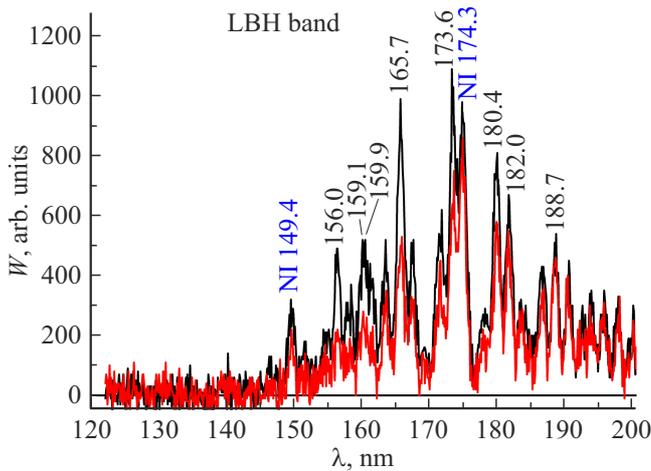
**Рис. 3.** Спектральная плотность энергии излучения  $W$  при разряде в воздухе из осевой части трубки.  $p = 0.35$  Торр,  $f = 2$  kHz. LBH — полосы Лаймана–Бирджа–Хопфида. Интенсивность излучения в области 100–260 nm увеличена в 25 раз. Входная щель монохроматора 100  $\mu$ m.

интенсивностей полос 2+ и 1- систем азота из различных частей кварцевой трубки. Как известно [20,21], в области усиленного электрического поля спектральная плотность энергии излучения  $W$  полос 1- системы молекулярного иона азота (наиболее интенсивные полосы 391.4 и 427.8 nm) увеличивается. При этом также увеличивается отношение интенсивностей полос иона азота с длиной волны 391.4 nm к полосе 2+ системы молекулы азота с длиной волны 394.3 nm, что свидетельствует о более высокой температуре электронов в областях около острых кромок кольцевых электродов.

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов напряжения между кольцевыми электродами, а также тока разряда при подключении высоковольтного вывода

генератора, имеющего отрицательную полярность, к электроду 3. Расстояния между электродом 3 и фланцем 1, а также между электродом 4 и переходной камерой 5 были примерно одинаковыми (рис. 1, а) и равнялись  $\sim 28$  см. Изменение положения высоковольтного электрода существенно не влияло на форму данных импульсов. Пробой между электродами 3, 4 возникал примерно через 150 ns после подачи импульса напряжения. До пробоя регистрировался емкостный ток. Увеличение тока разряда при развитии пробоя отмечено на рис. 2 точкой Br. В этой точке скорость роста тока разряда возрастала, а рост напряжения замедлялся. Так как разряд между электродами 3, 4 был ограничен диэлектрическим барьером из стенок кварцевой трубки, то напряжение на промежутке продолжало увеличиваться после пробоя и при увеличении проводимости плазмы в области трубки 2 между электродами. Отметим, что при работе в импульсно-периодическом режиме максимальное значение напряжения между электродами уменьшалось по сравнению с однократными импульсами, а длительность импульса на полувысоте увеличивалась. Измерения также показали, что изменение полярности высоковольтного электрода при постоянной частоте следования импульсов напряжения в единицы килогерц и более, а также давлении воздуха в диапазоне (0.2–2) Торр существенно на форму импульсов напряжения и тока не влияет.

Основной целью настоящей работы, как уже отмечалось, было исследование спектров излучения разряда и определение относительной интенсивности различных полос при формировании ПДС, в том числе регистрация полос ЛБХ в ВУФ области спектра. На рис. 3 представлен спектр излучения разряда в воздухе из осевой части трубки в диапазоне от 120 до 550 nm, полученный с помощью монохроматора VM-502. Коротковолновая граница монохроматора проверялась по излучению второго континуума аргона, регистрируемая полоса которого имела максимум на длине волны 126 nm [23]. В спектре излучения на рис. 3 доминируют полосы 1- и 2+ систем азота, хотя большую часть трубки занимает свечение ПДС, которое имеет красный цвет. Интенсивность свечения ПДС с правой стороны была значительно больше, чем с левой, что связано с замыканием тока разряда на заземленную переходную камеру. Как известно, в спрайтах [4,11], а также в ПДС [19–21] красный цвет определяется излучением 1+ системы азота, которая не попала в область чувствительности данного монохроматора. Далее в статье будут приведены спектры, на которых будут показаны полосы излучения 2+, 1- и 1+ систем азота, полученные с помощью спектрометра HR2000+ES, а также фотография разряда с двумя ПДС. Формирование двух ПДС, направленных в разные стороны от плазмы, создаваемой емкостным разрядом между двумя внешними электродами, связано с ее примерно одинаковым потенциалом в области между электродами, а также удалением электродов от обоих торцов кварцевой трубки. Как было показано в

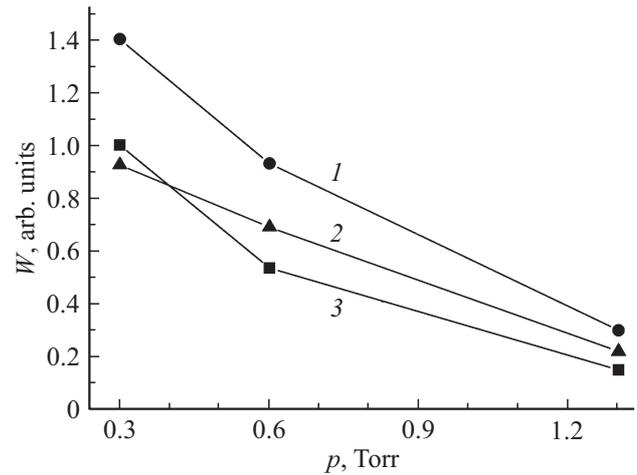


**Рис. 4.** Спектральная плотность энергии излучения  $W$  разряда в воздухе (красные линии) и в азоте (черные линии) из осевой части трубки.  $p = 0.6$  Torr,  $f = 2$  kHz. Ширина входной щели монохроматора  $25 \mu\text{m}$ . Горизонтальные обозначения длин волн использованы для молекулярных полос Лаймана–Бирджа–Хопфилда (LBH), вертикальные для атомарных линий азота.

работе [20], при установке электродов у торца кварцевой трубки ПДС распространялись только в одну сторону.

Полосы ЛБХ и линии атомарного азота в ВУФ области спектра, а также полосы NO в области 200–300 nm имели сравнительно малую спектральную плотность энергии  $W$ . На рис. 3 их интенсивность увеличена в 25 раз. Основной причиной малой интенсивности излучения полос ЛБХ является поглощение ВУФ излучения молекулами кислорода в области короче 200 nm [24]. Поэтому регистрация этих полос в спектрах излучения красных спрайтов затруднена. Однако при моделировании разряда спрайтов из расчетов следует их наличие при низких давлениях воздуха и азота [14]. Кроме того, их наличие подтверждают эксперименты, цитируемые в [11].

Ни рис. 4 приведены спектры излучения воздуха и азота в области 120–200 nm, полученные с помощью монохроматора VM-502 при ширине входной щели  $25 \mu\text{m}$ . Спектр излучения в азоте был снят, чтобы показать влияние кислорода на интенсивность излучения ПДС в ВУФ области спектра. Полосы ЛБХ молекул азота и атомарные линии азота регистрировались как в воздухе, так и в азоте. Однако их интенсивность в воздухе была меньше, чем в азоте. Сравнительно малое отличие интенсивностей полос и линий, полученное в данных экспериментах, обусловлено примесью молекулярного кислорода к азоту, который абсорбировался на стенках кварцевой трубки и откачного шланга, а затем выделялся при зажигании разряда. В длинноволновой части ВУФ области спектра (190–200 nm), где поглощение молекулярного кислорода еще относительно мало, интенсивности на отдельных переходах полосы ЛБХ в воздухе и азоте в данных условиях практически совпа-

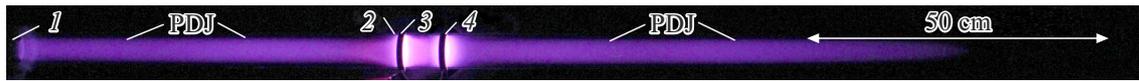


**Рис. 5.** Зависимости спектральной плотности энергии излучения  $W$  линии атомарного азота с длиной волны 174.3 nm от давления воздуха, полученные при положительной (1, 2) и отрицательной (3) полярностях высоковольтного электрода, при подключении высоковольтного вывода генератора к электроду 4 (1, 3) и к электроду 3 (2). Ширина щели монохроматора  $25 \mu\text{m}$ ,  $f = 2$  kHz.

ли. Регистрируемое излучение линий атомарного азота связано с эффективной диссоциацией молекул  $\text{N}_2$  при возбуждении электрическим разрядом в условиях высокого приведенного электрического поля (более 100 Td). Известно, что в импульсных разрядах атмосферного давления с высоким перенапряжением регистрируется интенсивное излучение линий атома и атомарного иона азота [25].

На рис. 5 приведены зависимости  $W$  для линии атомарного азота с длиной волны 174.3 nm, который нарабатывается в разрядной трубке при диссоциации молекул азота, от давления воздуха. Для всех трех кривых уменьшение давления воздуха приводило к росту спектральных плотностей энергии излучения линий азота из ПДС. Подобные зависимости имели место и для полос ЛБХ, изменение величины  $W$  которых происходило вместе с изменением  $W$  линий атомарного азота с длинами волн 174.3 и 149.4 nm.

Сравнение спектральных плотностей энергии излучения в ПДС для 2+ и 1+ систем азота, а также для 1- и 2+ было проведено при использовании кварцевой трубки длиной 220 см с теми же толщиной стенки, диаметром и маркой кварцевого стекла GE-214. Фотография разряда в этой серии экспериментов показана на рис. 6. Кольцевые электроды 3, 4 так же, как и на рис. 1, были установлены на расстоянии 6 см друг от друга. Они были изготовлены из фольги толщиной  $100 \mu\text{m}$  и имели ширину 1 см, но были удалены от торцов кварцевой трубки. Электрод 3 был удален от левого (относительно читателя) торцевого фланца на 63 см и от правого, который находится за пределами данной фотографии, на расстоянии 149 см. Торцы трубки закрывались слева фланцем из диэлектрика, а справа — из нержавеющей



**Рис. 6.** Фотография интегрального свечения плазмы двух плазменных диффузных струй (PDJ), которые формировались одновременно в трубке длиной 220 см при давлении воздуха  $p = 1$  Torr. 1 — левый фланец из диэлектрика, 2 — слабое свечение стенки кварцевой трубки, 3 и 4 — внешние кольцевые электроды из фольги. Амплитуда напряжения между электродами 7 kV,  $f = 1$  kHz.

шей стали. Электрод 4 был электрически подсоединен к плоской металлической плите экспериментального стенда. Отметим, что на формирование ПДС положение кварцевой трубки относительно экспериментального стенда не оказывало влияния. При ее вертикальной установке относительно поверхности Земли и плоской плиты стенда ПДС также формировались и распространялись в обе стороны от кольцевых электродов (рис. 9, *d* в работе [19]).

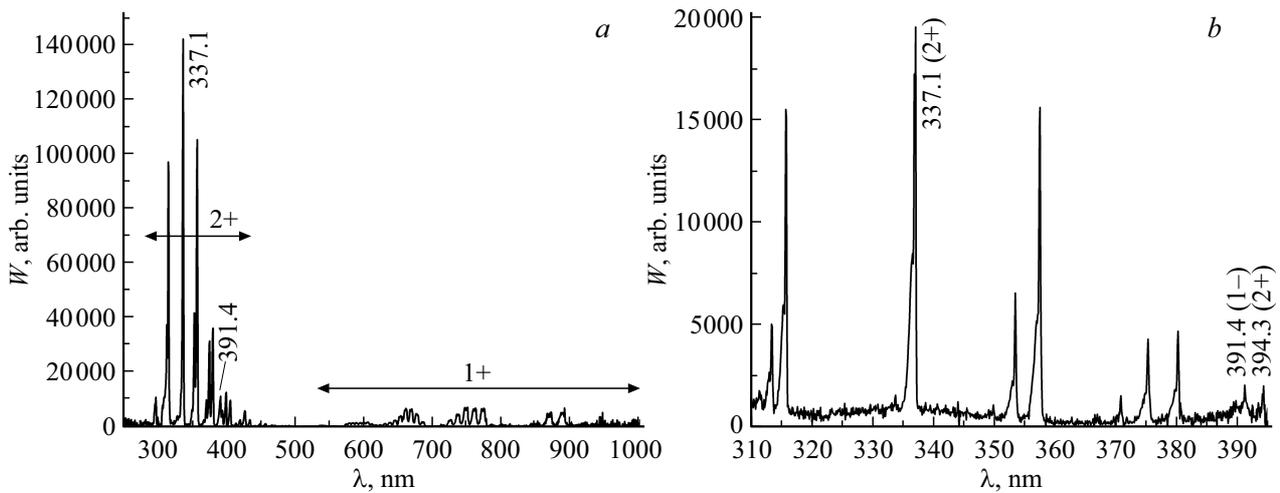
Такое расположение электродов и кварцевая трубка большой длины были выбраны специально для измерения спектра излучения ПДС, на которую не влияло увеличение тока разряда через заземленный правый фланец на торце кварцевой трубки. В условиях, соответствующих рис. 6, только левая ПДС достигала фланца 1, а правая ПДС оканчивалась на расстоянии  $\sim 80$  см от электрода 4, не достигнув правого металлического торца. Импульсы высокого напряжения положительной или отрицательной полярности подавались на электрод 3. Спектры излучения, полученные для этих условий с помощью двух спектрометров из области ПДС, находящейся справа на расстоянии 21 см от электрода 4, приведены на рис. 7. Для спектров на рис. 7 высоковольтный электрод 3 имел положительную полярность, а электрод 4 был заземлен. Изменение полярности электрода 3 не оказывало существенного влияния на спектр излучения ПДС. Из спектрограммы на рис. 7, *a* следует, что наибольшая спектральная плотность энергии в диапазоне длин волн  $\Delta\lambda = 250\text{--}1000$  nm приходится на полосы второй положительной (2+) системы  $C^3P_u\text{--}B^3P_g$  молекулярного азота  $N_2$ . При этом, как и в работах [19–22], максимальная  $W$  регистрируется на полосе с  $\lambda = 337.1$  nm (колебательный переход 0–0). Для наиболее сильных полос 1+ системы азота (система переходов  $B^3P_g\text{--}A^3\Sigma_u^+$ ) регистрировалась более чем на порядок меньшая  $W$ . Однако, как видно из рис. 6, а также из рисунков, приведенных в работах [19–22], излучение полос 1+ системы азота придает красный оттенок свечению ПДС при низких давлениях воздуха ( $< 2$  Torr). Для левой ПДС спектры излучения на расстоянии 21 см от электрода 3 имели такое же распределение спектральной плотности энергии. При изменении условий возбуждения, давления и уменьшении относительной влажности воздуха можно улучшить соответствие цвета ПДС цвету столбчатых спрайтов, формируемых в верхних слоях атмосферы Земли.

Спектры излучения при съемке из области разряда, находящейся на расстоянии 1 см от левой кромки высоковольтного электрода 3 отрицательной полярности, приведены на рис. 8. Полярность импульсов напряжения существенно не влияла на спектры излучения из областей плазмы на малых расстояниях от электродов. В приэлектродной области, как и следовало ожидать, интенсивность излучения первой отрицательной полосы (1-;  $B^2\Sigma_u^+ \text{--} X^2\Sigma_g^+$ ) системы молекулярного иона азота  $N_2^+$  (линии с длинами волн 391.4, 427.8 и 470.9 nm) существенно увеличилась. При этом также увеличиваются соотношения  $R_{391/337}$  и  $R_{391/394}$  пиковых интенсивностей излучения полос молекулярного иона азота  $N_2^+$  ( $\lambda = 391.4$  nm) и молекулы азота  $N_2$  ( $\lambda = 337.1$  nm и  $\lambda = 394.3$  nm). Это свидетельствует о высокой напряженности приведенного электрического поля в этой области и соответственно более высокой температуре электронов [19–21]. В данной области так же, как и в ПДС, различие наиболее интенсивных полос излучения 2+ и 1+ систем азота весьма велико, всего в три раза меньше, чем на рис. 7, *a*. Однако отношение интенсивностей полос (1-) излучения молекулярного иона азота и молекулы азота (2+) в приэлектродной области существенно изменилось. Из экспериментов следовало, что  $W$  полос 1- системы азота у обеих кромок двух кольцевых электродов была высокой и могла на малых расстояниях от кромки электрода, где реализуется наибольшее приведенное электрическое поле, превышать  $W$  полос 2+ системы азота. Отметим, что приэлектродная область разряда не относится к ПДС, она является продолжением области плазмы барьерного разряда в трубке между внешними кольцевыми электродами, которая инициирует и формирует ПДС.

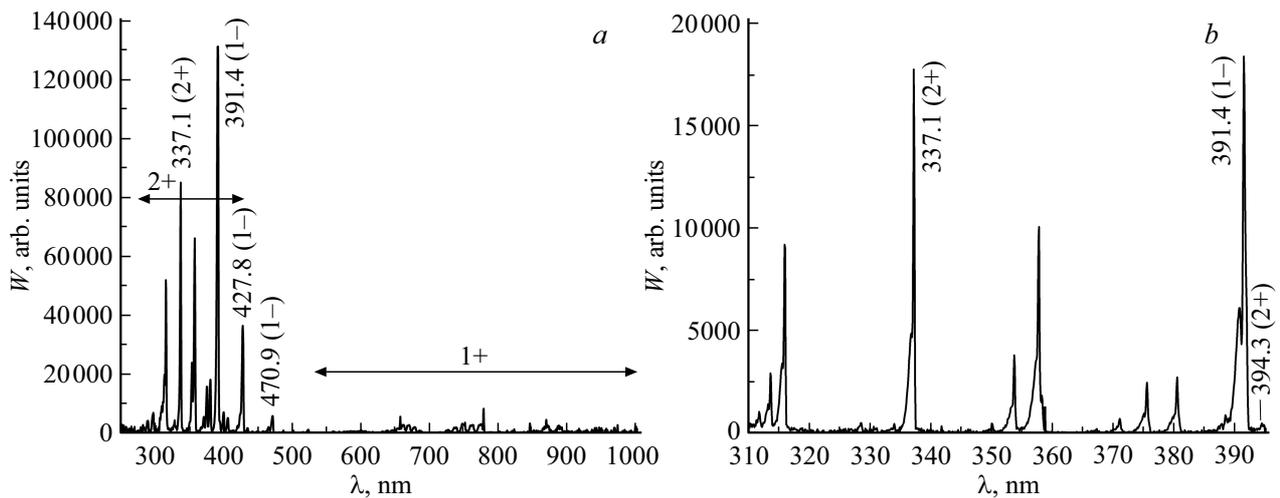
Благодаря высокому приведенному электрическому полю в области разряда около острой кромки электродов в спектрах излучения при уменьшении давления воздуха появляются линии атомарного кислорода (777.1, 844.6 nm) и водорода (656.3 nm), а также полосы CO, CO<sub>2</sub> и другие (см. работу [20], в которой приведены спектры излучения при высоких электрических полях). Эти линии и полосы также могут наблюдаться в красных спрайтах [11].

## Обсуждение полученных результатов

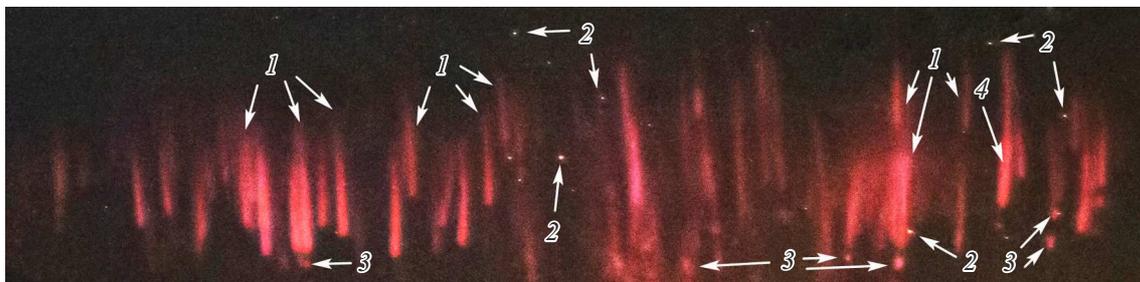
Для наглядности при обсуждении результатов, полученных в настоящей работе, используем фотографию



**Рис. 7.** Спектральная плотность энергии излучения ПДС в диапазоне  $\Delta\lambda = 250\text{--}1000\text{ nm}$  при регистрации спектрометром HR2000+ES (a) и  $310\text{--}395\text{ nm}$  при регистрации спектрометром HR4000 (b) на расстоянии 21 см от правой кромки заземленного электрода 4. Давление воздуха  $p = 0.3\text{ Torr}$ ,  $f = 2\text{ kHz}$ .



**Рис. 8.** Спектральная плотность энергии излучения ПДС в диапазоне  $\Delta\lambda = 250\text{--}1000\text{ nm}$  при регистрации спектрометром HR2000+ES (a) и  $310\text{--}395\text{ nm}$  при регистрации спектрометром HR4000 (b) на расстоянии 1 см от левой кромки высоковольтного электрода 3 отрицательной полярности. Давление воздуха  $p = 0.3\text{ Torr}$ ,  $f = 2\text{ kHz}$ .



**Рис. 9.** Фотография столбчатых красных спрайтов, которая было получена исследователем ТСЯ, профессиональным фотографом, Frankie Lucena. Снимок был сделан 1 октября 2016 г. над областью грозовой активности в Cabo Rojo, Puerto Rico. 1 — столбчатые спрайты, 2 — наиболее яркие звезды, которые использовались для калибровки светимости красных спрайтов, 3 — яркие точки (beads), 4 — отдельные яркие области (glow).

столбчатых спрайтов, показанную на рис. 9. Столбчатые красные спрайты обычно регистрируются не в виде одного „столба“, а как несколько параллельных „каналов“, которые распространяются сверху вниз. При этом форма отдельного канала может быть весьма простой, как показано на рис. 9. Эта форма близка к форме ПДС, которые мы наблюдаем в экспериментах. Хорошо известно, что формы красных спрайтов отличаются многообразием и размерами. В литературе используют следующие названия различных спрайтов: столбчатые [9–11], морковные [26], ангельские [27]. Для сравнения с нашими экспериментальными мы выбрали наиболее простые по форме столбчатые спрайты. Как правило, они зарождаются из нижней части гало и распространяются вниз за счет положительного стримера [11,20]. Движение стримера вниз инициирует резкое увеличение электрического поля между гало (доминирование положительного заряда) и верхним слоем грозовых облаков (резкое увеличение отрицательного заряда). Обычно это происходит при развитии молнии из положительно заряженного облака на Землю после обратного удара [1,2,20]. Положительный стример формирует столбчатый спрайт, который распространяется вниз. На более поздних стадиях из верхней части „столба“ может инициироваться отрицательный стример, который распространяется вверх от поверхности Земли [27]. На рис. 9 показаны спрайты, развитие которых заканчивается до формирования отрицательных стримеров. Однако для части из них после темной области внизу спрайта видны яркие точки 3 (beads). Кроме того, у некоторых „столбов“ появляются более яркие протяженные области 4 (glow).

Проведенные исследования позволили получить при разряде в воздухе низкого давления для аналогов красных столбчатых спрайтов соотношения между спектральной плотностью энергии четырех различных полос. Подтверждено, что соотношение интенсивностей отдельных полос при импульсно-периодическом емкостном разряде, инициирующем ПДС в кварцевой трубке, зависит от места их излучения и давления воздуха. Показано, что основное влияние на спектры и цвет разряда оказывает напряженность электрического поля, которая достигает наибольших значений у кольцевых электродов [20]. На основании этого можно однозначно утверждать, что в работе [12] увеличение отношения интенсивности полосы с длиной волны 427.8 nm (1-) к интенсивности полосы с длиной волны 337.1 nm при уменьшении высоты над уровнем моря от 60 до 50 km связано с увеличением приведенной напряженности электрического поля. Голубой цвет спрайтов наблюдался на высотах менее 50 km во многих работах [28].

Отношения спектральных плотностей энергии в различных диапазонах длин волн, в том числе в ВУФ области, также весьма важны для определения основных процессов, происходящих в красных спрайтах. Полученные результаты показывают, что эти соотношения в различных областях разряда изменяются прежде всего из-за различий в приведенном электрическом поле.

По-видимому, в основные столбы спрайтов вливаются вторичные стримеры, которые образуются в областях атмосферы около спрайтов. Их формирование меняет цвет и форму „столбов“ спрайтов. В частности, на появление стримеров может влиять разделение зарядов в серебристых облаках, которые состоят из кристаллов льда [29]. В ПДС на удалении от электродов спектры излучения и цвет ПДС существенно не изменяются, что связано с сохранением условий их распространения. Изменение спектров и цвета происходит в областях около электродов и у окончания ПДС.

Подробные измерения спектров излучения при формировании отдельных областей ПДС, а также экспериментальное моделирование различных условий для реализации ярких областей свечения при столкновении стримеров [30] позволят уточнить физические механизмы формирования спрайтов. В частности, такие исследования будут полезны для объяснения появления областей glow и bead в красных спрайтах, а также различия их форм.

## Выводы

На установке, созданной для формирования ПДС в воздухе и азоте, исследовано излучение четырех наиболее интенсивных систем полос азота (2+, 1+, 1- и ЛБХ). Также было зарегистрировано излучение на атомарных линиях азота, кислорода и водорода. Эти полосы и линии, а также полосы других молекул и ионов присутствуют при разрядах в воздухе низкого давления и при повышении чувствительности системы измерений должны регистрироваться в спектрах красных спрайтов, а также других ТСЯ [1,2,11].

Для полос 2+ и 1- систем азота, а также ВУФ переходов ЛБХ излучение зарегистрировано одновременно. Полученные данные также позволяют уточнять результаты подробных расчетов на различных полосах азота, которые приведены в работе [14] для широкого набора приведенных напряженностей электрического поля. При этом можно отметить как совпадение расчетных и экспериментальных тенденций, так и их отличие.

Установлено, что излучение полос ЛБХ регистрируется в ПДС при различных давлениях воздуха, несмотря на сильное поглощение молекулярного кислорода. Данный результат согласуется с выводом работы [31] о важной роли излучения этой полосы для продвижения волны ионизации в невозбужденный газ за счет фотоионизации. Наличие ВУФ излучения также объясняет более высокую однородность импульсных разрядов в азоте по сравнению с разрядами в воздухе, которая наблюдается при наносекундных разрядах высокого давления [32]. Предполагаем, что полученные результаты могут быть полезны при изучении спектральных характеристик красных спрайтов и других ТСЯ.

## Благодарности

Авторы статьи выражают глубокую благодарность профессиональному фотографу Frankie Lucena за предоставленный снимок и разрешение использовать его в данной статье, а также благодарят Д.С. Печеницину за разработку импульсно-периодического генератора и Д.А. Сорокина за поддержку данной работы.

## Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме № FWRM-2021-0014.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] V.V. Surkov, M. Hayakawa. *Surv. Geophys.*, **41** (5), 1101 (2020). DOI: 10.1007/s10712-020-09597-2
- [2] F.J. Gordillo-Vázquez, F.J. Pérez-Invernón. *Atm. Res.*, **252**, 105432 (2021). DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105432
- [3] H.C. Stenbaek-Nielsen, M.G. McHarg, R. Haaland, A. Luque. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2020JD033170 (2020). DOI: 10.1029/2020JD033170
- [4] C.L. Kuo, E. Williams, T. Adachi, K. Ihaddadene, S. Celestin, Y. Takahashi, R.R. Hsu, H.U. Frey, S.B. Mende, L.C. Lee. *Front. Earth Sci.*, **9**, 687989 (2021). DOI: 10.3389/feart.2021.687989
- [5] R.C. Franz, R.J. Nemzek, J.R. Winckler. *Science*, **249**, 48 (1990).
- [6] D.D. Sentman, E.M. Wescott, D.L. Osborne, D.L. Hampton, M.J. Heavner. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 1205 (1995).
- [7] G.K. Garipov, B.A. Khrenov, P.A. Klimov, V.V. Klimenko, E.A. Mareev, O. Martines, E. Mendoza, V.S. Morozenko et al. *J. Geophys. Res.: Atmosph.*, **118**, 370 (2013).
- [8] A. Jehl, T. Farges, E. Blanc. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **118**, 454 (2013).
- [9] C. Köhn, O. Chanrion, T. Neubert. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **124**, 3083 (2019).
- [10] M.B. Garnung, S. Celestin, T. Farges. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **126**, e2020JA028824 (2021).
- [11] V.P. Pasko. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **16** (1), S13 (2007). DOI: 10.1088/0963-0252/16/1/S02
- [12] J. Morrill, E. Bucsela, C. Siefiring, M. Heavner S.D. Moudry, S. Slinker, D. Fernsler, E. Wescott, D. Sentman, D. Osborne. *Geophys. Res. Lett.*, **29** (10), 1462 (2002). DOI: 10.1029/2001GL014018
- [13] H.C. Stenbaek-Nielsen, M.G. McHarg, T. Kanmae, D.D. Sentman. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L11105 (2007). DOI: 10.1029/2007GL029881
- [14] F. Jiang, C. Huang, Y. Wang. *Meteorol. Atmosph. Phys.*, **131**, 421 (2019).
- [15] A.C. Кириллов, В.Б. Белаховский. *Геомагнетизм и аэронавигация*, **60** (6), 796 (2020). DOI: 10.31857/S0016794020060073 [A.S. Kirillov, V.B. Belakhovsky. *Geomagn. Aeron.*, **60**, 781 (2020). DOI: 10.1134/S0016793220060079].
- [16] Y. Goto, Y. Ohba, K. Narita. *J. Atmosph. Electr.*, **27** (2), 105 (2007). DOI: 10.1541/jae.27.105
- [17] A. Robledo-Martinez, A. Garcia-Villarreal, H. Sobral. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **122**, 948 (2017). DOI: 10.1002/2016JA023519
- [18] F.C. Parra-Rojas, M. Passas, E. Carrasco, A. Luque, I. Tanarro, M. Simek, F.J. Gordillo-Vázquez. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **118** (7), 4649 (2013). DOI: 10.1002/jgra.50433.
- [19] V. Tarasenko, N. Vinogradov, E. Baksht, D. Sorokin. *J. Atmosph. Sci. Res.*, **5** (03), 26 (2022). DOI: 10.30564/jasr.v5i3.4858
- [20] В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, Н.П. Виноградов, Д.А. Сорокин. *Опт. и спектр.*, **130** (12), 1769 (2022). DOI: 10.21883/OS.2022.12.54080.4014-22 [B.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, N.P. Vinogradov, D.A. Sorokin. *Opt. Spectrosc.*, **130** (12), 1499 (2022). DOI: 10.21883/EOS.2022.12.55234.4014-22].
- [21] D.A. Sorokin, V.F. Tarasenko, E.Kh. Baksht, N.P. Vinogradov. *Physics of Plasmas*, **30** (8), 083515 (2023). DOI: 10.1063/5.0153509
- [22] В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, В.А. Панарин, Н.П. Виноградов. *Физика плазмы*, **49** (6), 590 (2023). DOI: 10.31857/S0367292123700245, EDN: WYLTGE [V.F. Tarasenko, E.K. Baksht, V.A. Panarin, N.P. Vinogradov. *Plasma Physics Reports*, **49** (6), 786 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23700393].
- [23] В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко, В.А. Панарин, Д.А. Сорокин. *ПТЭ*, **67** (3), 57 (2024). [V.S. Skakun, V.F. Tarasenko, V.A. Panarin, D.A. Sorokin. *Instruments and Experimental Techniques*, **67** (3), 519 (2024). DOI: 10.1134/S0020441224700817].
- [24] Г.Н. Герасимов. *УФН*, **174** (2), 155 (2004). [G.N. Gerasimov. *Physics-Uspekhi*, **47** (2), 149 (2004). DOI: 10.1070/PU2004v047n02ABEH001681].
- [25] B. Zhang, Y. Zhu, X. Zhang, N. Popov, T. Orrière, D.Z. Pai, S.M. Starikovskaia. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **32** (11), 115014 (2023). DOI: 10.1088/1361-6595/ad085c
- [26] A. Malagon-Romero, J. Teunissen, H.C. Stenbaek-Nielsen, M.G. McHarg, U. Ebert, A. Luque. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2019GL085776 (2020). DOI: 10.1029/2019GL085776
- [27] W. Lyons. *Weatherwise*, **75** (6), 14 (2022). DOI: 10.1080/00431672.2022.2116249
- [28] T. Kanmae, H.C. Stenbaek-Nielsen, M.G. McHarg, R.K. Haaland. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L13808 (2010). DOI: 10.1029/2010GL043739
- [29] M. Hervig, R.E. Thompson, M. McHugh, L.L. Gordley, J.M. Russell III, M.E. Summers. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 971 (2001). DOI: 10.1029/2000GL012104
- [30] В.Ф. Тарасенко, Н.П. Виноградов, Е.Х. Бакшт, Д.А. Сорокин, Д.С. Печеницин. *Оптика атмосферы и океана*, **37** (4), 294 (2024). DOI: 10.15372/AOO20240405 [V.F. Tarasenko, N.P. Vinogradov, E.Kh. Baksht, D.A. Sorokin, D.S. Pechenitsin. *Atmospheric and Oceanic Optics*, **37** (4), 547 (2024). DOI: 10.1134/S1024856024700738].
- [31] A. Fierro, J. Lehr, B. Yee, E. Barnat, C. Moore, M. Hopkins, P. Clem. *J. Appl. Phys.*, **129** (7), 073302 (2021). DOI: 10.1063/5.0033412
- [32] V.F. Tarasenko (ed.). *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges* (Nova Science Publishers, Inc., NY, 2014).