

Яркие области излучения в воздухе низкого давления при встрече плазменных диффузных струй

В.Ф. Тарасенко[✉], Н.П. Виноградов, Е.Х. Бакшт,
Д.А. Сорокин, Д.С. Печеницин*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 31.08.2023;
после доработки 02.10.2023;
принята к печати 25.01.2024

Исследуется свечение плазменных диффузных струй (ПДС), которые позволяют моделировать в атмосферном воздухе низкого давления некоторые свойства красных спрайтов — импульсных разрядов, наблюдаемых в верхних слоях атмосферы Земли на высотах 40–100 км. ПДС инициировались плазмой импульсно-периодического емкостного разряда, создаваемой в кварцевой трубке между двумя внешними электродами, и распространялись одновременно в противоположные стороны. Для формирования ПДС, которые двигались навстречу друг другу, использовались две пары кольцевых электродов, установленных на расстоянии 66 см. При подаче от генераторов на каждую пару кольцевых электродов однополярных импульсов напряжения с задержкой в сотни наносекунд было обнаружено появление ярких областей (ЯО) свечения, подобных наблюдаемым в нижней области «столбчатых» спрайтов. Установлено, что при напряжении генераторов 7 кВ оптимальным для появления ЯО является давление воздуха 1–2 торр. Показано, что ЯО возникают благодаря взаимодействию стримеров, из которых состоят ПДС. Измерена скорость распространения фронта ПДС при положительной полярности импульсов напряжения, подаваемых на кольцевые электроды. Получены фотографии и спектры излучения ПДС, а также ЯО в ПДС. С помощью программы SPECAIR проведены расчеты параметров плазмы в разных областях ПДС. Установлено, что в области появления ЯО среднее значение температуры электронов уменьшается. Полученные результаты будут полезны при изучении свойств красных спрайтов.

Ключевые слова: плазменные диффузные струи, разряд в воздухе низкого давления, взаимодействие стримеров, яркие области свечения, спектры излучения; diffuse plasma jet, discharge in low-pressure air, interaction between streamers, bright area of luminescence, emission spectrum.

Введение

Атмосферные разряды, которые наблюдаются на высотах более 20 км, продолжают привлекать внимание исследователей и профессиональных фотографов [1–4]. Наибольшее число публикаций посвящено красным спрайтам, которые возникают на высотах от 40 до 100 км. Они имеют разнообразные формы и начиная с высоты ~50 км н.у.м. красный цвет [5–8]. Подробную информацию о свойствах красных спрайтов, а также об истории их исследований можно найти в большом числе публикаций (см. ссылки, которые приведены выше, а также [9–11]). В настоящей работе мы не будем подробно описы-

вать известные результаты, касающиеся высотных атмосферных разрядов, которые опубликованы в ведущих журналах. Основное внимание будет уделено экспериментальному моделированию некоторых свойств красных спрайтов, которые до сих пор не имеют общепринятого объяснения. Для получения новых данных о красных спрайтах будут использованы их лабораторные аналоги, условия получения которых изучались в работах [12–15].

Одной из разновидностей красных спрайтов являются «столбчатые» [8, 9]. На фотографиях они похожи на красные цилиндры, которые, как достоверно установлено, распространяются вниз за счет формирования положительного стримера [7]. Ниже основного «столба» таких спрайтов располагается темная область, в которой видны участки яркого свечения различного размера со слабым свечением между ними [16, 17]. В некоторых случаях яркие области (ЯО) имеют форму коротких цилиндров. На рис. 1 приведена фотография различных типов спрайтов.

* Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Никита Петрович Виноградов (vinikitavin@mail.ru); Евгений Хаимович Бакшт (beh@loi.hcei.tsc.ru); Дмитрий Алексеевич Сорокин (SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru); Дмитрий Сергеевич Печеницин (pechenitsin@loi.hcei.tsc.ru).

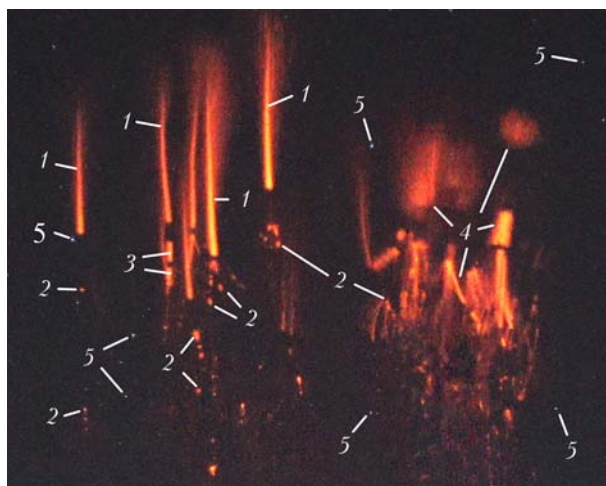


Рис. 1. Фотография спрайтов различной формы: 1 — столбчатые спрайты; 2 — отдельные ЯО в виде точек; 3 — отдельные ЯО в виде цилиндров; 4 — спрайты другой формы; 5 — звезды (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.04>)

Столбчатые спрайты возникают на высоте 60–80 км н.у.м. и распространяются сверху вниз к облакам, чаще всего грозовым [5, 8]. Отдельные ветви спрайтов (стримеры) другой формы могут распространяться в различных направлениях, в том числе параллельно поверхности земли [8, 10].

Как мы уже отмечали, особенностью столбчатых спрайтов является резкая граница их светимости в нижней части длинных «столбов» (1) и четочная структура на более низких высотах (2 и 3). При этом в основном четки представляют собой ЯО в виде точек (2). Также наблюдаются ЯО в виде коротких цилиндров (3). На рис. 1 показаны четочные структуры различных размеров и форм не только для столбчатых спрайтов, но и для спрайтов другой формы (4). Данная фотография была сделана в ночное время, когда хорошо видны звезды (5). Четочные структуры обеих форм наблюдаются в нижней части столбчатых спрайтов, четок

может быть несколько со слабой интенсивностью свечения между ними (см. также рис. 1 в [16]). Однако физическая причина появления ЯО в виде точек и цилиндров, а также природа резкой нижней границы у столбчатых спрайтов до настоящего времени не установлены.

Цель нашей работы — получить в лабораторных условиях плазменные образования, подобные по форме и цвету столбчатым спрайтам, а также определить условия формирования ЯО на удалении от нижней границы основного «столба» спрайта (1 на рис. 1).

Отметим, что экспериментальное моделирование свойств красных спрайтов проводилось в нескольких лабораториях (см., например, [18–20]). Однако только в наших работах [12–15] были получены условия, в которых формируются плазменные диффузные струи (ПДС), имеющие красный цвет и распространяющиеся со скоростью стримеров в столбчатых спрайтах. Кроме того, в [14] было установлено, что свечение ПДС обусловлено формированием стримеров, число которых в одной струе может достигать трех. Также было показано, что спектры ПДС подобны спектрам красных спрайтов (см., например, [17, 21]) и состоят в основном из полос второй (2+) и первой (1+) положительных систем азота. Исследования в [12–15] показали, что для инициирования плазменных диффузных струй, состоящих из стримеров, лучше использовать емкостный разряд с высокой частотой следования импульсов. Это позволяет исключить контакт аналогов красных спрайтов с металлическими электродами.

Экспериментальная установка и методики измерений

Для формирования ПДС применялась установка, которая вместе с фотографией, показывающей излучение плазменных диффузных струй, ЯО между ними и разряды между двумя парами электродов, приведена на рис. 2.

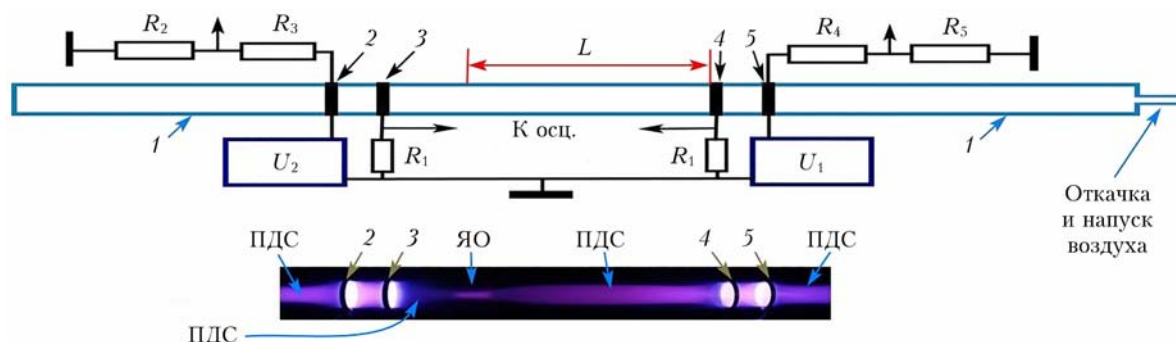


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для изучения условий появления ЯО при встрече ПДС, инициируемых емкостным разрядом (вверху), а также фотография излучения ПДС (экспозиция 0,25 с) при давлении воздуха $p = 1,5$ торр с ЯО в виде цилиндра и свечения емкостного разряда между двумя парами электродов (внизу): 1 — кварцевая трубка; 2 — высоковольтный электрод, соединенный с генератором U_2 и делителем напряжения (R_2-R_3); 3 — электрод, заземленный через шунт R_1 и соединенный с генератором U_2 ; 4 — электрод, заземленный через второй шунт R_1 и соединенный с генератором U_1 ; 5 — высоковольтный электрод, соединенный с генератором U_1 и делителем напряжения (R_4-R_5); L — расстояние от левого края электрода 4 до места расположения в черном экране щели шириной 1 см, через которую излучение подавалось на спектрометр или фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.04>)

Для инициирования ПДС при отсутствии контакта плазмы с электродами применялся, как мы уже отмечали, емкостный разряд, а кольцевые электроды располагались на внешней поверхности кварцевой трубки 1. Для зажигания емкостного разряда использовались два импульсно-периодических генератора U_1 и U_2 , которые создавали импульсы напряжения с амплитудой ≈ 7 кВ и длительностью на полувысоте $\approx 1,3$ мкс. Фронт и спад импульсов напряжения имели длительность $\approx 0,4$ мкс. Все опыты, как и в [12–15], проводились с частотой следования импульсов 21 кГц, при которой цвет ПДС близок к цвету столбчатых спрайтов. Расстояние между электродами, подключенными к каждому генератору, равнялось 6 см. Электроды 3 и 4 располагались на расстоянии 66 см друг от друга, а электроды 2 и 5 — на таком же расстоянии от ближайших торцов кварцевой трубки. Ширина всех четырех кольцевых электродов 2–5 равнялась 1 см. Кварцевая трубка имела длину 215 см и внутренний диаметр 5 см. Она откачивалась до давления 10^{-2} торр, а затем заполнялась комнатным воздухом до 1–2 торр. В большинстве экспериментов температура воздуха в лаборатории составляла $\approx 30^\circ\text{C}$, а его относительная влажность $\approx 40\%$. Мы измеряли перед каждым экспериментом давление воздуха, а также влажность и температуру и старались работать в одинаковых условиях.

На фотографии внизу рис. 2 показано свечение плазмы в центральной части трубки с ЯО между электродами 3 и 4 в виде короткого цилиндра. Зажигание разряда осуществлялось при включении двух генераторов положительной полярности. Задержка запуска генератора U_2 относительно генератора U_1 равнялась 235 нс. Форма и место появления ЯО зависели от времени задержки между запуском генераторов, а также от давления и влажности воздуха.

Напряжение на электродах измерялось делителями АКТАКОМ АСА-6039 с сопротивлением $R_2 = R_5 = 900$ кОм и $R_3 = R_4 = 900$ МОм. Ток разряда определялся шунтами R_1 с сопротивлением 3 Ом. Сигналы с делителей и шунтов подавались на осциллограф MDO 3104 (1 ГГц, частота дискретизации 5 выборок/нс). Оптическое излучение плазмы разряда в трубке регистрировалось цифровым фотоаппаратом Canon 2000D, спектрометрами HR2000+ES (диапазон 200–1150 нм; оптическое разрешение $\approx 0,9$ нм) и HR4000 (диапазон 300–400 нм; оптическое разрешение $\approx 0,2$ нм) с известными значениями спектральной чувствительности, а также кремниевым ФЭУ (SiФЭУ) в составе модуля MicroFC-SMA-10035. Щель шириной 0,5 или 1 см, через которую с помощью световода регистрировались импульсы и спектры излучения, располагалась на расстоянии L от левого края заземленного кольцевого электрода 4. Остальная часть кварцевой трубки закрывалась черным экраном. Измерение параметров оптического излучения спектрометром и ФЭУ, а также фотографирование разряда проводились при отсутствии постороннего освещения за тысячи импульсов.

Результаты исследований

В работе основное внимание было уделено изучению свойств излучения ПДС при давлении воздуха 1–2 торр и различных задержках между запуском генераторов с напряжением U_1 и U_2 . В этих условиях стабильно регистрировались ЯО свечения при встрече ПДС. В атмосфере Земли при таких давлениях наблюдается нижняя часть спрайтов, диаметр ветвей которых уменьшается [9, 11, 21], а цвет может меняться с красного на голубой (см. рис. 2 в [17]). Кроме того, появляется множество отдельных ярких пятен (см. рис. 1, 2). Также наблюдается столкновение отдельных стримеров [16]. В спрайтах отличие ЯО (пятен) от стримеров состоит в том, что ЯО длительное время (~ 10 мкс) остаются на месте, а головки стримеров перемещаются со скоростью ~ 10 м/мкс [16].

Наша установка позволяла формировать ПДС как от плазмы между одной парой электродов (от одного генератора), так и между двумя парами (от двух генераторов). Кроме того, можно было регулировать задержку между запуском генераторов. На рис. 3 показаны импульсы напряжения U_1 и U_2 на кольцевых электродах, а также токи i_1 и i_2 в контурах «генератор — электроды — плазма емкостного разряда».

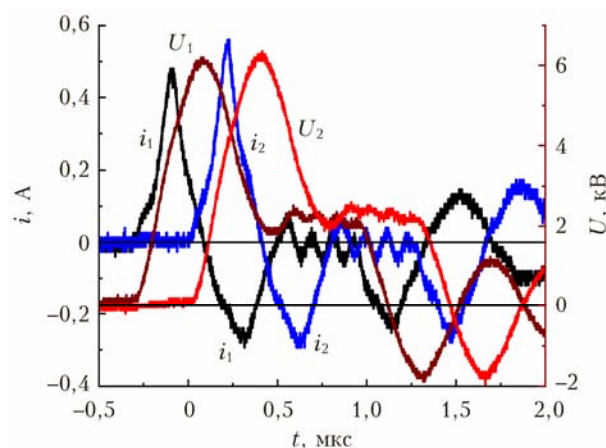


Рис. 3. Импульсы тока i_1 и i_2 , а также напряжения U_1 и U_2 при включении двух генераторов положительной полярности с задержкой между импульсами напряжения ≈ 320 нс; $p = 1,5$ торр, $U \approx 7$ кВ (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.04>)

Пробой воздуха при подаче импульсов напряжения U_1 и U_2 от генераторов с частотой 21 кГц происходил на их фронте, поэтому максимальные амплитуды импульсов напряжения в этом режиме были меньше, чем напряжение на электродах при отсутствии пробоя газа. Импульсы тока разряда имели сложную форму с изменением направления тока на отдельных пиках. Наибольшие амплитуды импульсов тока были у первых пиков, и их полярность соответствовала полярности импульса напряжения, подаваемого на электроды. Как было показано в [14], в таких условиях формируется ПДС

с первым положительным стримером. Изменяя задержку между включением генераторов с напряжением U_2 и U_1 можно было влиять на место встречи фронтов ПДС и, следовательно, фронтов положительных стримеров в ПДС, стартующих от плазмы, создаваемой между электродами 2 и 3, 4 и 5. При давлениях воздуха от 1 до 2 торр формы и амплитуды импульсов тока и напряжения существенно не менялись, но при наличии задержки между запуском генераторов изменялось положение ЯО между электродами 3 и 4. Это связано с влиянием давления воздуха на скорость распространения ПДС и ее длину (см., например, [12]). Достоверно было установлено, что задержка между включением генераторов U_1 и U_2 существенно влияла на место появления ярких пятен и их форму. Свечение разряда при описываемой задержке, равной 320 нс, показано на рис. 4.

На фотографии на рис. 4 изображена вся кварцевая трубка, на ней видны четыре ПДС, также показано место встречи двух сходящихся ПДС с двумя ЯО и ВЯО. В данной работе исследовались характеристики ЯО, которая имела меньший диаметр и наблюдалась в более широком диапазоне экспериментальных условий. При сближении ПДС яркость их свечения в видимой области спектра уменьшалась. Однако в области их встречи появлялись ЯО и ВЯО, которые были смещены к электроду 3. Это смещение связано с задержкой запуска генератора U_2 . Увеличение задержки между запуском генераторов с напряжением U_1 и U_2 приводило к большему смещению ЯО к электроду 3. Форма и число ЯО при варьировании времени задержки и давления воздуха могли изменяться, но их количество не превышало двух.

С уменьшением давления воздуха скорость перемещения фронта ПДС увеличивалась, что приводило к большему смещению ЯО при равных задержках между включением генераторов. Так, при $p = 1$ торр и задержке 220 нс ЯО появлялась на расстоянии $L \approx 50$ см от левого края электрода 4, а при задержке 120 нс — при $L \approx 42$ см. С увеличением давления до 1,5 торр и задержке 220 нс ЯО появлялась на расстоянии $L \approx 45$ см от левого края электрода 4, а при задержке 120 нс — при $L \approx 39$ см. Запаздывание момента встречи фронтов ПДС и, следовательно, стримеров в ПДС увеличивалось с ростом задержки между запуском генераторов, и ЯО регистрировались ближе к электродам, соединенным с генератором U_2 , который включался позднее. Если сравнить ЯО на рис. 2 и 4, то видно отличие в их форме. При многократных съемках

было установлено, что на форму и размеры ЯО и ВЯО влияют задержка между запуском генераторов, давление и влажность воздуха.

Подробные исследования оптических сигналов из ПДС на пяти различных расстояниях L от электрода 4 были проведены с помощью ФЭУ. Задержка в этих опытах между включениями генераторов U_1 и U_2 также составила 320 нс. На рис. 5 приведены импульсы тока при данной задержке и импульсы излучения, зарегистрированные в области яркого пятна, а также слева и справа от него.

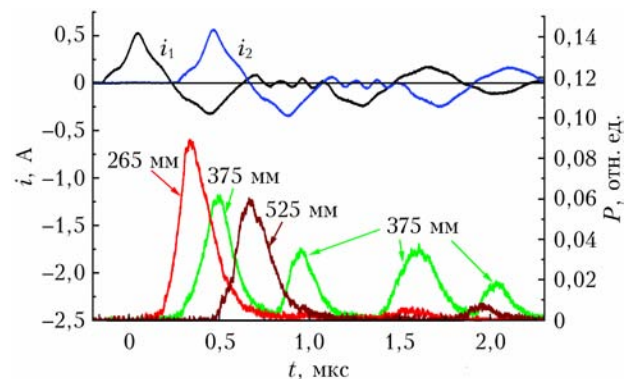


Рис. 5. Импульсы тока i_1 и i_2 , а также сигналы с ФЭУ при включении двух генераторов положительной полярности с задержкой 320 нс. Расстояния L от левого края электрода 4 до правого края щели шириной 0,5 см в черном экране, который устанавливался на поверхности кварцевой трубки, составляли 265, 375 и 525 мм. Световод ФЭУ располагался напротив центра щели; $p = 1,5$ торр, $U \approx 7$ кВ; P — мощность излучения (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.04>)

Вначале импульс излучения от стримера в левой ПДС, стартовавшей от электродов 4 и 5, регистрировался у электрода 4, соединенного с генератором U_1 , который включался первым. При включении только одного генератора U_1 с удалением от места инициирования амплитуда импульса излучения из ПДС плавно уменьшалась. При одновременном включении двух генераторов интенсивность излучения при $L = 525$ мм и далее уменьшалась быстрее, чем при включении одного генератора. В центре между электродами 3 и 4 при одновременном запуске генераторов интенсивность излучения встречных ПДС подавлялась.

При задержке между запуском генераторов 320 нс в области встречи фронтов ПДС, с расстояния ≈ 375 мм от электрода 4, снова наблюдалось увеличение интенсивности сигнала с ФЭУ (рис. 5).

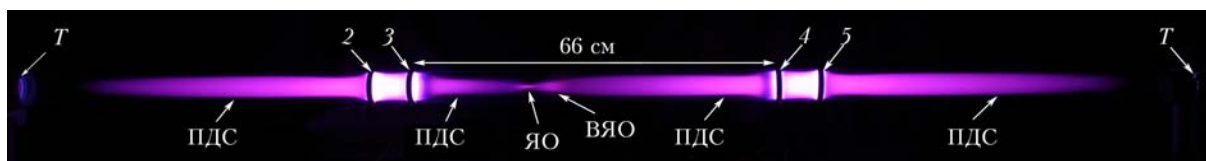


Рис. 4. Фотография разряда, полученная при включении двух генераторов с импульсами напряжения одинаковой полярности, $p = 1,5$ торр, $U \approx 7$ кВ, экспозиция 1 с: 2, 5 — высоковольтные электроды; 3, 4 — заземленные электроды. Здесь и далее T — торцы кварцевой трубки; ВЯО — вторая ЯО (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.04>)

Кроме того, в области ЯО регистрировались дополнительные импульсы излучения с большими задержками (рис. 5). Середина ЯО при этом находилась в центре щели в экране на расстоянии ≈ 375 мм от электрода 4. Дальнейшее смещение щели и световода ФЭУ к электроду 3 приводило к увеличению оптического сигнала по сравнению с его величиной при включении одного генератора U_1 . При включении двух генераторов в этой области на расстоянии 525 мм от электрода 4 ЯО и ВЯО отсутствовали. Кроме того, импульсы излучения с запаздыванием 1 мкс и более не рассматривались или имели малую амплитуду. Таким образом, только в месте появления ЯО наблюдается несколько световых импульсов значительной амплитуды.

В опытах с различными схемами включения генераторов было зарегистрировано влияние приведенного электрического поля на интенсивность излучения в ПДС. Для этого одна из пар электродов (2 и 3) заземлялась. Свечение разряда в кварцевой трубке при $p = 1$ торр и включении одного генератора U_1 показаны на рис. 6.

Вначале пробой воздуха происходил между электродами 4 и 5, а затем от созданной плазмы в обе стороны распространялись ПДС, каждая из которых состояла из одного или двух стримеров. При положительной полярности импульса напряжения от электродов 4 и 5 в обе стороны вначале распространялся положительный стример. Подробно формирование ПДС и стримеров в трубке с одним генератором описаны в работах [14, 22]. При достижении левой ПДС заземленного электрода 3 резко уменьшилась ее интенсивность, что хорошо видно при увеличении яркости изображения на нижней фотографии рис. 6. Уменьшение интенсивности излучения правой ПДС связано с ограничением ее продвижения правым торцом T кварцевой трубки.

Сравнение спектров излучения из ЯО и других областей между электродами 3 и 4 показало, что в области 280–900 нм наибольшие интенсивности имеют вторая (2+) и первая (1+) положительные системы азота (рис. 7).

Спектры излучения были подобны спектрам для ПДС, приведенным в работах [12–15]. Из рис. 7 видно, что спектральная плотность энергии W наиболее интенсивной полосы 2+ системы азота с длиной волны $\lambda = 337$ нм существенно выше, чем у полосы 1+ системы азота с $\lambda = 763$ нм. Как и в [12–15], это

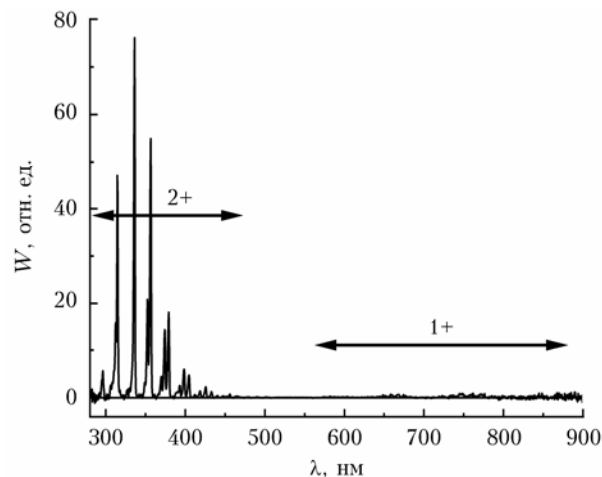


Рис. 7. Спектр излучения разряда в ЯО, полученный с помощью спектрометра HR2000 при $p = 1,5$ торр и задержке между запуском генераторов ≈ 320 нс

отличие составляло около двух порядков. В экспериментах с ФЭУ также регистрировалось в основном излучение полос 2+ системы азота в ультрафиолетовой области спектра, импульсы излучения которой имели сравнительно короткую длительность (см. рис. 5).

В яркой области, а также на расстояниях 15 см слева от ее центра ЯО и 11 см справа сравнивались суммарные энергии излучения в спектральных областях 290–460 нм для 2+ системы азота и 560–780 нм для 1+ системы. Оказалось, что отношение этих энергий в ЯО меньше на 20–30%, чем при удалении от ЯО вправо и влево. При регистрации излучения полос 1+ системы азота длительность импульсов излучения увеличивалась до ≈ 10 мкс. Излучение полос 1+ системы выделялось с помощью светофильтра ЖС-12 с пропусканием в области 500–950 нм более 80% и поглощением в области короче 450 нм.

Применяя к спектрам излучения методы оптической эмиссионной спектроскопии, основанные на измерении соотношения пиковых интенсивностей ионной N_2^+ ($\lambda = 391$ нм) и молекулярной N_2 ($\lambda = 394$ нм) полос 1+ и 2+ систем азота [23, 24] соответственно, были определены средние значения приведенной напряженности электрического поля E/N (N — концентрация частиц газа) и температуры электронов T_e как в ЯО, так и на удалении

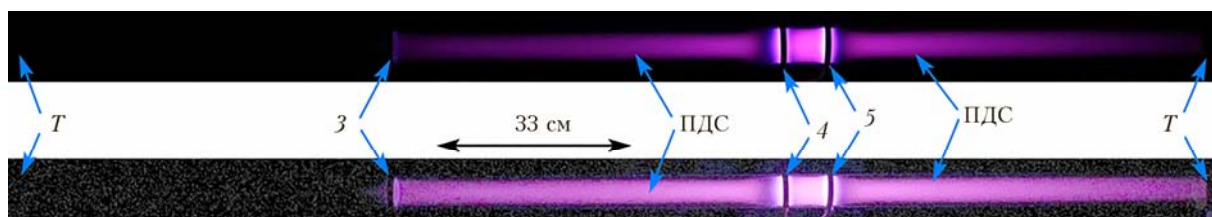


Рис. 6. Фотографии разряда, полученные с инициированием ПДС от плазмы емкостного разряда между электродами 4 и 5, на которые импульс напряжения подавался от генератора с напряжением U_1 при заземленных электродах 2 и 3 (электрод 2 не видно из-за слабой светимости разряда). Для верхнего снимка экспозиция 0,25 с; для нижнего светимость ПДС для тех же условий увеличена за счет коррекции яркости и контраста верхней фотографии (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.04>)

от нее. Установлено, что приведенная напряженность электрического поля $E/N \approx 250$ Тд ($1 \text{ Тд} = 10^{-17} \text{ В} \cdot \text{см}^2$) и, следовательно, электронная температура ($T_e \approx 2,5$ эВ) в зоне ЯО ниже. Например, на расстоянии 7 см влево от ОЯ $E/N \approx 365$ Тд и $T_e \approx 3,65$ эВ. Как и в [15], корректность измерения указанных плазменных параметров подтверждается моделированием эмиссионного спектра плазмы при помощи программного кода SPECAIR [25, 26], для чего дополнительно из экспериментально полученного спектрального распределения энергии излучения определялись колебательная T_v , вращательная T_r и газовая T_g температуры.

Обсуждение

В настоящих опытах при давлении воздуха 1–2 торр и задержке между запуском генераторов U_1 и U_2 в сотни наносекунд во время встречи ПДС, состоящих из положительных стримеров, стабильно регистрировалось свечение ЯО. Однако при отсутствии задержки между запуском однополярных генераторов U_1 и U_2 излучение ПДС при сближении струй подавлялось и ЯО не регистрировались. Понятно, что при одинаковых полярностях импульсов напряжения электрическое поле и ток между ПДС уменьшались, что должно снижать интенсивность излучения. Подобное подавление интенсивности излучения двух одинаковых волн ионизации во время их встречи наблюдалось в публикации [22], где использовалась трубка диаметром 15 мм и длиной 100 см, которая заполнялась неоном или аргоном низкого давления. На концах трубки устанавливались металлические электроды, на которые подавались импульсы напряжения одинаковой амплитуды и полярности с частотой 100 Гц. В наших экспериментах применялась установка, показанная на рис. 2, в которой электроды не имели контакта с плазмой и диэлектрическая трубка заполнялась воздухом. При давлении воздуха 1 торр на разные пары кольцевых электродов одновременно подавались импульсы одинаковой или разной полярности. При одинаковой полярности импульсов напряжения в настоящей работе, как и в [22], было зарегистрировано подавление свечения разряда в центре трубки, однако при разной полярности было получено значительное увеличение интенсивности излучения между электродами 3 и 4.

Проведенные опыты показали ключевую роль задержки между запуском генераторов U_1 и U_2 в появлении ЯО. Встреча ПДС происходила на разных расстояниях от места их инициирования, следовательно, электрические поля на фронте стримеров в ПДС имели разную амплитуду. Это, в частности, подтверждает уменьшение интенсивности излучения ПДС при удалении их от места инициирования (см. рис. 6, верхний снимок). Варьирование электрического поля приводит к локальному изменению тока между фронтами однополярных стримеров. Также может меняться ток между областями положительного и отрицательного зарядов

при встрече двух стримеров с различными концентрациями зарядов. Плотность тока за счет этих локальных изменений увеличивается, а напряженность электрического поля на этом участке кварцевой трубки уменьшается, что приводит (как мы предполагаем, за счет начала развития ионизационно-перегревной неустойчивости) к уменьшению поперечного размера разряда и образованию ЯО. Считаем, что эти процессы определяют появление красных ЯО за счет повышения интенсивности излучения полос 1+ системы азота при встрече ПДС.

Таким образом, смещение места встречи ПДС за счет изменения задержки между запуском генераторов приводит к изменению места появления ЯО. Дополнительные импульсы излучения возникают, когда токи имеют противоположенное направление между электродами 2 и 3, 4 и 5. При разнонаправленных i_1 и i_2 амплитуда тока между электродами 3 и 4 увеличивается и приводит к возбуждению полос 2+ и 1+ систем азота и появлению дополнительных импульсов излучения. Наибольшие амплитуды эти импульсы имеют в ЯО с малыми поперечными размерами. На рис. 5 видно, что амплитуда дополнительных импульсов (второго, третьего и четвертого) пропорциональна разностям амплитуд между токами i_1 и i_2 .

Падение интенсивности излучения ПДС у заземленного электрода 3 на нижней фотографии на рис. 6 также связано с изменением приведенной напряженности электрического поля в этой области. Из-за увеличения погонной электрической емкости в области электрода 3 уменьшается электрическое поле на фронте стримера. Это приводит к его торможению и остановке, следовательно, тормозится и останавливается ПДС.

При изучении столбчатых красных спрайтов с использованием камер с высоким временным разрешением [16, 17] зарегистрированы стримеры, которые движутся вниз, а затем замедляются и останавливаются, а также ЯО, положение которых в пространстве после их появления существенно не изменяется. Кроме того наблюдаются стримеры, которые распространяются в различных направлениях. Все эти явления обусловлены изменением приведенного электрического поля в стратосфере и мезосфере, в том числе при взаимодействии отдельных стримеров. Сравнительно быстрые изменения приведенного электрического поля обусловлены грозowymi облаками, а также молниями, достигающими поверхности земли. Мы предполагаем, что наблюдаемые в эксперименте и столбчатых спрайтах ЯО, положение которых в пространстве существенно не изменяется, связано с взаимодействием стримеров, возникающих в различных областях при их встрече.

Заключение

В настоящей работе показано, что при встрече однополярных плазменных диффузных струй, состоящих из стримеров, в воздухе низкого давления

могут формироваться локальные области с более ярким свечением полос 1+ и 2+ систем азота. Установлено, что при напряжении импульсных генераторов ≈ 7 кВ наиболее легко получить ЯО в излучении ПДС при давлении 1,5 торр. Обязательным условием для получения ЯО является задержка в сотни наносекунд между запуском генераторов, инициирующих однополярные ПДС, которые движутся навстречу друг другу. При уменьшении давления длина области с более ярким свечением плазмы увеличивается, а интенсивность ее излучения уменьшается. С помощью спектров излучения второй положительной системы молекулы азота и программы SPECAIR показано, что в области встречи ПДС приведенная напряженность электрического поля и температура электронов уменьшаются, что можно объяснить увеличением плотности электронов между областями в стримерах с концентрацией зарядов различного знака. На основе данных результатов появление четочной структуры в нижней части столбчатых красных спрайтов можно объяснить встречей однополярных стримеров, которые обязательно должны иметь различные концентрации заряженных частиц.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность профессиональному фотографу Frankie Lucena за предоставленный снимок (рис. 1) и разрешение использовать его в нашей статье.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИСЭ СО РАН (проект № FWRM-2021-0014).

Список литературы

1. Xu C., Qie X., Sun Z., Yang J., Zhang H., Chen A.B.C. Transient luminous events and their relationship to lightning strokes over the Tibetan Plateau and its comparison regions // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2023. V. 128. P. e2022JD037292. DOI: 10.1029/2022JD037292.
2. Kuo C.-L., Huang T.-Y., Hsu C.-M., Sato M., Lee L.-C., Lin N.-H. Resolving elve, halo and sprite halo images at 10,000 Fps in the Taiwan 2020 campaign // *Atmosphere*. 2021. V. 12, N 8. P. 1000. DOI: 10.3390/atmos12081000.
3. Huang A., Lu G., Yue J., Lyons W., Lucena F., Lyu F., Cummer S.A., Zhang W., Xu L., Xue X., Xu S. Observations of red sprites above Hurricane Matthew // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. P. 13. DOI: 10.1029/2018GL079576.
4. Pasko V.P., Yair Y., Kuo C.L. Lightning related transient luminous events at high altitude in the Earth's atmosphere: Phenomenology, mechanisms and effects // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 168, N 1. P. 475–516. DOI: 10.1007/s11214-011-9813-9.
5. Stenbaek-Nielsen H.C., Haaland R., McHarg M.G., Hensley B.A., Kanmae T. Sprite initiation altitude measured by triangulation // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2010. V. 115, N A8. P. A00E12. DOI: 10.1029/2009JA014850.
6. Jehl A., Farges T., Blanc E. Color pictures of sprites from non-dedicated observation on board the International Space Station // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118. P. 454–461. DOI: 10.1029/2012JA018144.
7. Pasko V.P., Qin J., Celestin S. Toward better understanding of sprite streamers: Initiation, morphology, and polarity asymmetry // *Surv. Geophys.* 2013. V. 34, N 6. P. 797–830. DOI: 10.1007/s10712-013-9246-y.
8. Qin J., Celestin S., Pasko V.P., Cummer S.A., McHarg M.G., Stenbaek-Nielsen H.C. Mechanism of column and carrot sprites derived from optical and radio observations // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40, N 17. P. 4777–4782. DOI: 10.1002/grl.50910.
9. Kanmae T., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Haaland R.K. Diameter-speed relation of sprite streamers // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. V. 45, N 27. P. 275203. DOI: 10.1088/0022-3727/45/27/275203.
10. Malagon-Romero A., Teunissen J., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Ebert U., Luque A. On the emergence mechanism of carrot sprites // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. P. e2019GL085776. DOI: 10.1029/2019GL085776.
11. Singh M., Sharma P.K., Pathak P.P. Radiation phenomenon due to streamers of sprites // *J. Electromag. Anal. Appl.* 2022. V. 14, N 3. P. 31–37. DOI: 10.4236/jemaa.2022.143003.
12. Tarasenko V., Vinogradov N., Bakst E., Sorokin D. Ionization waves, propagating in opposite directions, as in red sprites // *J. Atmos. Sci. Res.* 2022. V. 5, N 4. P. 26–36. DOI: 10.24018/ejgeo.2022.3.6.322.
13. Бакут Е.Х., Виноградов Н.П., Тарасенко В.Ф. Формирование стримеров в неоднородном электрическом поле при низких давлениях воздуха // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35. № 9. С. 777–781; Bakst E.K., Vinogradov N.P., Tarasenko V.F. Generation of streamers in an inhomogeneous electric field under low air pressure // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N S1. P. S159–S164. DOI: 10.1134/S1024856023010025.
14. Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Панарин В.А., Виноградов Н.П. Стримеры, инициируемые емкостным разрядом при давлениях воздуха 0,2–6 торр // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49, № 6. С. 590–599. DOI: 10.31857/S0367292123700245, EDN: WYLTGE.
15. Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Bakst E.K., Vinogradov N.P. Analogs of columnar sprites initiated in low-pressure air and nitrogen // *Phys. Plasmas*. 2023. V. 30. P. 083515. DOI: 10.1063/5.0153509.
16. Luque A., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Haaland R.K. Sprite beads and glows arising from the attachment instability in streamer channels // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. V. 121. P. 2431–2449. DOI: 10.1002/2015JA022234.
17. Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Haaland R., Luque A. Optical spectra of small-scale sprite features observed at 10,000 fps // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2020. V. 125. P. e2020JD033170. DOI: 10.1029/2020JD033170.
18. Robledo-Martinez A., Garcia-Villarreal A., Sobral H. Comparison between low-pressure laboratory discharges and atmospheric sprites // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122. P. 948–962. DOI: 10.1002/2016JA023519.
19. Goto Y., Ohba Y., Narita K. Optical and spectral characteristics of low pressure air discharges as sprite models // *J. Atmos. Electr.* 2007. V. 27, N 2. P. 105–112. DOI: 10.1541/jae.27.105.
20. Соснин Э.А., Бабаева Н.Ю., Кожевников В.Ю., Козырев А.В., Найдис Г.В., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Моделирование транзиентных световых явлений средней атмосферы Земли с помощью апокампического разряда // *Успехи физ. наук*. 2021. Т. 191, № 2. С. 199–219. DOI: 10.3367/UFNr.2020.03.038735.
21. Kanmae T., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M.G., Haaland R.K. Observation of blue sprite spectra at 10,000 fps // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. P. L13808. DOI: 10.1029/2010GL043739.

22. *Shishpanov A.I., Ivanov D.O., Kalinin S.A.* Collision of ionization waves in long discharge tubes // *Plasma Res. Express*. 2019. V. 1. P. 025004. DOI: 10.1088/2516-1067/ab1b8d.
23. *Britun N., Gaillard M., Ricard A., Kim Y.M., Kim K.S., Han J.G.* Determination of the vibrational, rotational and electron temperatures in N₂ and Ar–N₂ RF discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2007. V. 40. P. 1022–1029. DOI: 10.1088/0022-3727/40/4/016.
24. *Paris P., Aints M., Valk F., Plank T., Haljaste A., Kozlov K.V., Wagner H.-E.* Intensity ratio of spectral bands of nitrogen as a measure of electric field strength in plasmas // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. P. 3894–3899. DOI: 10.1088/0022-3727/38/21/010.
25. *Laux C.O.* Radiation and Nonequilibrium Collisional-Radiative Models, Physico-Chemical of High Enthalpy and Plasma Flows. Belgium: von Karman Institute Lecture, 2002.
26. *Starikovskaia S.M., Anikin N.B., Pancheshnyi S.V., Starikovskii A.Yu.* Time-resolved emission spectroscopy and its applications to the study of pulsed nanosecond high-voltage discharges // *Proc. SPIE*. V. 2002. N 4460. P. 63–72. DOI:10.1117/12.459416.

V.F. Tarasenko, N.P. Vinogradov, E.Kh. Baksht, D.A. Sorokin, D.S. Pechenitsin. **Bright areas of radiation in low-pressure air when diffuse plasma jets meet.**

The glow of diffuse plasma jets (DPJ) is studied, which make it possible to simulate in low-pressure atmospheric air some properties of red sprites – pulsed discharges observed in the upper layers of the Earth's atmosphere at altitudes of 40–100 km. DPJs were initiated by the plasma of a pulse-periodic capacitive discharge created in a quartz tube between two external electrodes and propagated simultaneously in opposite directions. To form the DPJs, which moved towards each other, two pairs of ring electrodes were used, installed at a distance of 66 cm. When unipolar voltage pulses from generators were applied to each pair of ring electrodes with a delay of hundreds of nanoseconds, bright areas of luminescence (BAL) similar to those observed in the lower area of the column sprites appeared. It has been established that at a generator voltage of 7 kV, the optimal air pressure for the appearance of BAL is 1–2 Torr. It is shown that BALs arise due to the interaction of streamers that make up the DPJs. The speed of propagation of the DPJ front was measured for the positive polarity of voltage pulses applied to the ring electrodes. Photographs and emission spectra of the DPJs, as well as bright regions in the DPJs, were obtained. Using the SPECAIR program, plasma parameters were calculated in different areas of diffuse plasma jets. It has been established that in the region where BALs appear, the average value of the electron temperature decreases.