

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.527.9; 537.53

**Коронный разряд в воздухе атмосферного давления
при модулированном импульсе напряжения
длительностью 10 мс**

**Д.В. Рыбка¹, И.В. Андроников², Г.С. Евтушенко³, А.В. Козырев²,
В.Ю. Кожевников², И.Д. Костыря¹, В.Ф. Тарасенко¹,
М.В. Тригуб³, Ю.В. Шутько^{1*}**

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

³*Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30*

Поступила в редакцию 3.07.2012 г.

В воздухе атмосферного давления исследованы формирование и распад диффузных «каналов» коронного разряда, а также оптическое и рентгеновское излучение из коронного разряда. На промежуток подавались модулированные с частотой ~ 290 кГц импульсы высокого напряжения амплитудой ~ 250 кВ и длительностью по основанию ~ 10 мс. При атмосферном давлении воздуха из коронного разряда зарегистрировано мягкое рентгеновское излучение. В области диффузных «каналов» обнаружены яркие светящиеся точки и на удалении от «каналов» плазменные образования. Установлено, что на диффузных «каналах» коронного разряда появляются изгибы, длина которых увеличивается к концу импульса напряжения.

Ключевые слова: разряд в воздухе атмосферного давления, формирование и распад коронного разряда, рентгеновское и оптическое излучение; discharge in atmospheric pressured air, formation and degradation of corona discharge, X-ray and optical radiation.

Введение

В атмосфере Земли постоянно происходят импульсные разряды, которые оказывают влияние на жизнедеятельность человека. Однако исследования атмосферных разрядов весьма сложны, дороги и опасны, поэтому большое внимание уделяется изучению не только атмосферных, но и лабораторных разрядов [1]. Результаты исследований лабораторных разрядов находят применение в различных областях науки и техники [2], а также продолжают привлекать внимание исследователей. В частности, в воздухе атмосферного давления и других газах проводятся исследования коронного разряда при различных параметрах импульсов напряжения, подаваемых на электрод с малым радиусом кривизны [3–9]. В работах [5–8], посвященных исследованиям коронного разряда, при подаче на электрод импульсов напряжения с субна-

носекундным фронтом был зарегистрирован пучок убегающих электронов на значительном расстоянии от яркосветящейся области коронного разряда. На основе расчетов была показана важная роль характеристического излучения в формировании диффузных разрядов [7, 9]. Однако рентгеновское излучение при коронном разряде было зарегистрировано только при сравнительно коротких длительностях импульсов напряжения (десятки нс и менее). Подробные исследования формы диффузных «каналов» коронного разряда при их формировании и распаде, а также оптического излучения из коронного разряда для большинства режимов не проводились.

Цель данной работы — исследовать в воздухе атмосферного давления динамику формирования и распада диффузных «каналов» при импульсно-периодическом коронном разряде и больших длительностях (~ 10 мс) модулированного импульса напряжения. Данная работа продолжает исследования, начатые в [5–9].

Установка и методики

Коронный разряд в воздухе атмосферного давления формировался с использованием генератора

* Дмитрий Владимирович Рыбка; Игорь Владимирович Андроников; Геннадий Сергеевич Евтушенко (ime@trn.ru); Андрей Владимирович Козырев; Василий Юрьевич Кожевников; Игорь Дмитриевич Костыря; Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru); Максим Викторович Тригуб; Юлия Владимировна Шутько.

импульсов высокого напряжения, который подключали к электроду в виде острия. Генератор был собран на базе трансформатора Тесла. Коммутатором служила лампа ГУ-81. Генератор формировал импульсы напряжения, состоящие из отдельных цугов длительностью ~ 10 мс, которые следовали с частотой 50 Гц. Каждый цуг состоял из синусоидального сигнала с частотой колебаний ~ 290 кГц.

Высоковольтные импульсы прикладывались к цилиндрическому электроду из меди с вершиной в форме острия, который был залужен тонким слоем припоя. Диаметр электрода равнялся 3,6 мм. На расстоянии 5,2 см от вершины острия устанавливали металлический диск диаметром 12 см (рис. 1).

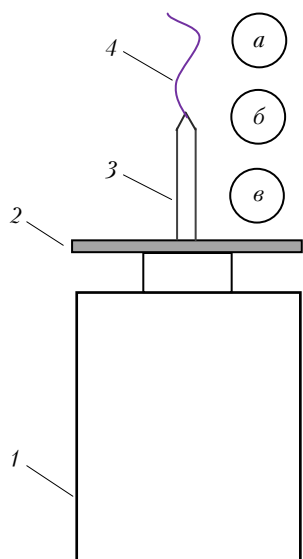


Рис. 1. Схема установки: 1 – генератор Тесла; 2 – металлический диск; 3 – острие; 4 – «канал» коронного разряда; а, б и в – точки расположения торца световода спектрометра для съемки спектров в различных областях коронного разряда

При удалении заземленного электрода на расстоянии от острия 40 см и более в воздухе атмосферного давления формировался коронный разряд. При меньших зазорах формировался слаботочный искровой разряд, ток которого не превышал 10 А. В ряде экспериментов вершина цилиндрического электрода помещалась в трубки диаметром 4–5 см из керамики, стекла или кварца. Трубки устанавливали на металлический диск 2. Толщина стенок трубок составляла 2–3 мм. Длина трубок превышала длину «канала» коронного разряда, и коронный разряд формировался только внутри трубок.

Для измерения амплитуды напряжения и формы сигнала в первичной и вторичной цепи высоковольтного трансформатора использовали омические делители напряжения. Импульсы напряжения во вторичной цепи импульсного трансформатора во время формирования коронного разряда, а также центральная часть цуга импульсов приведены в работах [6, 7]. Наибольшая разность между положительным и отрицательным максимумами напряжения в цуге достигала ~ 250 кВ.

Интегральную картину свечения разряда фотографировали фотоаппаратом SONY A100. Для регистрации динамики излучения коронного разряда использовали высокоскоростную камеру HiSpec 1 (Fastec Imaging Company, США). Длительность каждого кадра и паузы между импульсами изменялась от сотен микросекунд до единиц миллисекунд. Спектры излучения разряда снимали с помощью спектрометров EPP2000C-25 (StellarNet-Inc.) с известной спектральной чувствительностью в области от 200 до 850 нм. Электрические сигналы с шунтов, емкостных делителей и коллекторов подавались на осциллограф TDS-3034 (0,3 ГГц, 5 выборок за 1 нс).

Рентгеновское излучение регистрировалось по почернению рентгеновской пленки Kodak RAR film 2497. Рентгеновскую пленку помещали в непроницаемый для света и мягкого рентгеновского излучения конверт с окном диаметром 6 мм. Конверт располагался на диске (см. рис. 1). Окно в конверте закрывалось бериллиевой фольгой толщиной 15 мкм (длинноволновый край пропускания соответствовал энергии рентгеновских квантов $\sim 0,7$ кэВ). В ряде экспериментов бериллиевое окно закрывалась фольгой из алюминия толщиной 10 мкм или фольгой из меди толщиной 20 мкм, или несколькими слоями черной бумаги, в том числе металлизированной тонким слоем алюминия.

Экспериментальные результаты

Излучение коронного разряда в области 200–850 нм

Более подробные исследования показали, что спектры излучения из различных областей «канала» заметно отличаются. Наибольшую интенсивность излучения коронного разряда вдали от острия имеют полосы второй положительной системы азота (рис. 2, а), как и при использовании наносекундных импульсов напряжения [6]. Отметим, что диффузные каналы в удаленных областях (на расстоянии > 10 см от острия) имеют визуально голубоватый цвет, а на спектрограммах излучение в видимой области спектра практически отсутствует. На расстоянии ~ 20 см от острия и менее интегральный цвет коронного разряда начинает изменяться. Визуально излучение «канала» становится белым, а на спектрограмме (рис. 2, б), в видимой области спектра, появляется широкополосное излучение.

Кроме того, из коронного разряда вблизи острия увеличивается интенсивность излучения линий и полос материала электрода. Линия второй положительной системы азота с $\lambda = 337,1$ нм перестает быть наиболее интенсивной на спектрограмме.

При окружении коронного разряда трубкой из керамики при данной чувствительности спектрометра EPP2000C-25 оптическое излучение из области, прилегающей к трубке и металлическому диску, на котором помещался конверт с фотопленкой, зарегистрировать не удалось. Однако, как будет показано

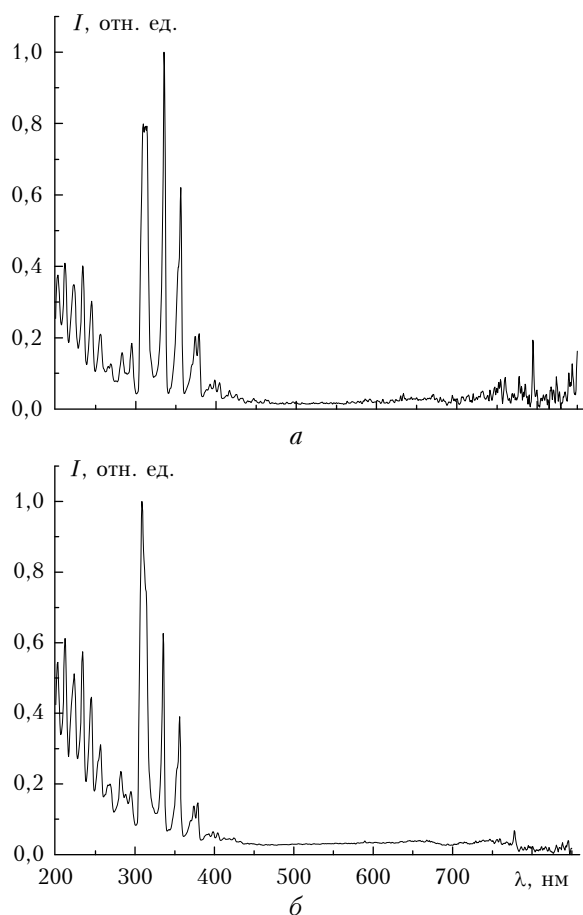


Рис. 2. Спектры излучения коронного разряда из области, находящейся на 20 см выше острия (а), и из области около острия (б)

ниже, рентгеновское излучение в этой области было зарегистрировано.

Изменение формы «канала» коронного разряда в отдельном импульсе

Как отмечено выше, исследования коронного разряда проводились в импульсно-периодическом режиме при частоте следования 50 Гц. На острие подавались модулированные импульсы напряжения с длительностью по основанию ~ 10 мс. На рис. 3, а показан коронный разряд, полученный при выдержке 2 мс, диффузный «канал» достиг своих максимальных размеров.

При подаче одного импульса напряжения может формироваться диффузный «канал», состоящий из одной или нескольких ветвей. На рис. 3, а видно свечение трех ветвей диффузного «канала». Основная ветвь начинается с острия. Концы ветвей «канала» имеют меньший диаметр, и они более прямые, а также отличаются по цвету. Как мы отмечали выше, они имеют голубоватый оттенок. Ближе к острию (электроду) видны изгибы на ветвях «канала», причем размеры изгибов к окончанию длительности импульса напряжения увеличиваются. Съемка свечения разряда с помощью скоростной видеокамеры

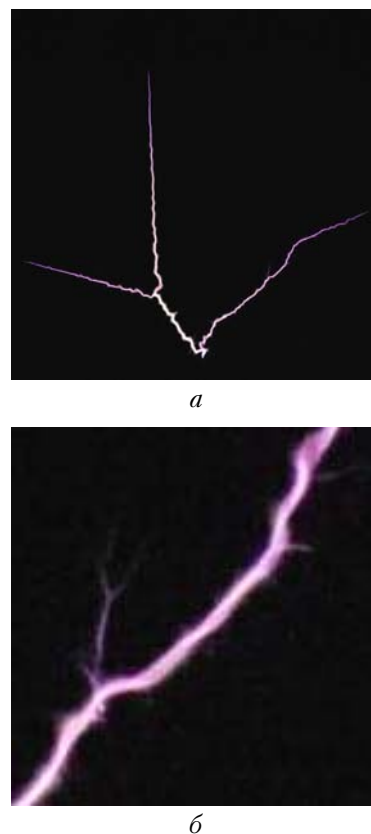


Рис. 3. Свечения разряда, полученные при выдержке 2 мс. Высота изображения 30 (а) и 3 (б) см

и фотоаппарата с короткими выдержками показала следующее.

1. При подаче импульса напряжения с острия в течение каждого импульса возникает и исчезает по окончании импульса напряжения «канал», который может ветвиться. При установке около вершины острия металлического диска, как показано на рис. 1, число ветвей «канала» уменьшается и эти ветви направлены преимущественно вверх. С боковых стенок «канала» наблюдается развитие стримеров (тонких «каналов»), которые имеют сравнительно малую длину. Вид стримера при увеличении показан на рис. 3, б. Изгибы на «канале» начинаются вначале на участках, прилегающих к острию, и величина изгибов увеличивается к концу импульса напряжения.

2. На ряде последовательно сделанных фотографий с вероятностью менее 10% наблюдались пробои, закорачивающие петлю (изгиб) на диффузном «канале» (рис. 4). Это можно связать с наличием достаточно высокой напряженности электрического поля, распределенной по длине диффузного «канала».

3. Были зарегистрированы плазменные образования, находящиеся на некотором удалении от основного диффузного «канала» (светлые точки слева от основания диффузного «канала» на рис. 4, а). Интенсивность излучения этих образований сравнима с интенсивностью излучения основных каналов. При этом плазменные образования соединены с основным «каналом» слабо светящейся перемычкой.



a



б



в

Рис. 4. Свечения разряда, полученные при выдержке 0,4 мс и паузах между кадрами (*a, б*) и (*б, в*) 1,6 мс. Высота изображения 3,5 см

4. На некоторых photographиях наблюдаются яркие точки, находящиеся на «канале», цвет которых отличается от цвета диффузного «канала». Такая точка показана на рис. 5.

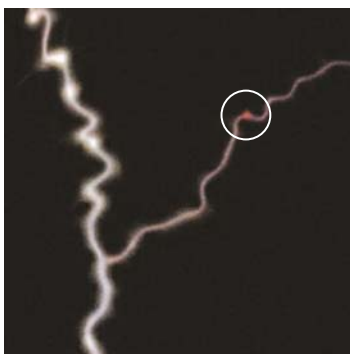


Рис. 5. Свечение разряда при выдержке 0,5 мс. Кругком отмечена яркая точка. Высота изображения 5 см

Подобные точки на photographиях встречаются довольно редко и возникают на разных участках «канала». Их цвет имеет красный оттенок.

Рентгеновское излучение при коронном разряде

В наших предыдущих работах [6, 7] зарегистрировать рентгеновское излучение при коронном разряде на данном генераторе с помощью сцинтиллятора и ФЭУ не удалось. В настоящей работе по засветке рентгеновской пленки было зарегистрировано рентгеновское излучение (рис. 6).

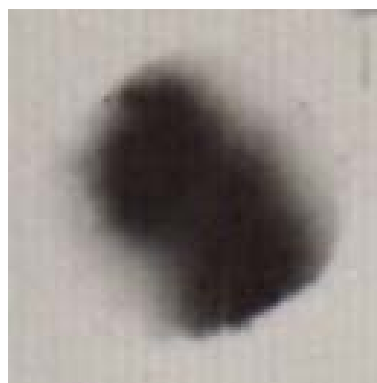


Рис. 6. Засветка пленки рентгеновским излучением за 11 мин. Дополнительные трубки и фильтры не использовались. Диаметр засвеченной области 6 мм

Положительный результат был получен благодаря применению тонкого фильтра из бериллия и расположению конверта с фотопленкой вблизи острия (см. рис. 1). Отметим, что рентгеновское излучение было зарегистрировано как при открытом коронном разряде, так и при экранировке излучения коронного разряда трубками из керамики, стекла и кварца. Наибольшую засветку пленки давало рентгеновское излучение коронного разряда без экранировки его трубками из диэлектрика. При экранировке коронного разряда трубкой из керамики почернение пленки было наименьшее. При экранировке трубкой из стекла степень почернения пленки увеличилась, но была меньше, чем при установке трубки из кварца. При установке фильтра из черной бумаги толщиной 300 мкм перед окном из бериллиевой фольги засветки фотопленки не было. Во всех опытах по регистрации рентгеновского излучения генератор включался на 11 мин.

Обсуждение полученных результатов

Как и предполагалось в наших предыдущих работах по исследованию коронного разряда [6, 7, 9], увеличение чувствительности системы регистрации позволило зарегистрировать рентгеновское излучение на данной установке. Известно, что убегающие электроны при пробое длинных промежутков генерируются на фронте развивающегося лидера [10],

соответственно при формировании диффузных «каналов» при коронном разряде должны генерироваться убегающие (быстрые) электроны. При торможении быстрых электронов на молекулах воздуха возникает тормозное [6, 7, 10] и характеристическое [7, 11] излучение, что обеспечивает формирование диффузных форм разряда, в том числе при положительной полярности импульсов напряжения.

В данной работе, по-видимому, впервые рентгеновское излучение получено при модулированном импульсе напряжения миллисекундной длительности и экранировке диффузного «канала» коронного разряда диэлектрическим экраном (трубкой из диэлектрика). Предполагаем следующий механизм генерации убегающих электронов в области около острия, в которой отсутствует видимое свечение и спектр излучения из которой не был зарегистрирован спектрометром ЕРР2000С-25. В области около острия и диффузного «канала» имеется некоторая концентрация начальных электронов. Эти электроны создаются за счет УФ- и ВУФ-излучения из диффузного «канала», а также за счет модулированного импульса напряжения миллисекундной длительности с амплитудой ~ 250 кВ.

ВУФ- и УФ-излучение при диффузных разрядах в газах повышенного давления, как известно, имеет высокую интенсивность (см., например, [11] и ссылки в ней). При изменении амплитуды напряжения частотой ~ 290 кГц, как следует из данных экспериментов, возникают электрические поля, достаточные для перевода части начальных электронов в режим убегания. При торможении этих электронов генерируются рентгеновские кванты, которые засвечивают пленку. Данный механизм объясняет засветку рентгеновской пленки при экранировке диффузного «канала» коронного разряда керамической трубкой. Также при наличии данного механизма будет наблюдаться большее почернение пленки при замене керамической трубки на стеклянную, которая пропускает мягкое УФ-излучение. При использовании кварцевой трубки почернение пленки станет более сильным. И наибольшее потемнение пленки наблюдалось в эксперименте без трубок, где вклад в засветку пленки могут давать оба механизма генерации убегающих электронов. В дальнейшем будет предпринята попытка разделить рентгеновское излучение, генерируемое на фронте диффузных «каналов» и в области, удаленной от диффузных «каналов».

Яркие точки красноватого цвета, которые появляются на ветвях диффузного «канала» (см. рис. 5), можно объяснить излучением разогретых пылинок. Пылинки, попадая в область разрядного канала, разогреваются, их температура повышается, и они начинают светиться.

Изменение цвета диффузного «канала» с голубоватого на белый на расстояниях от острия ~ 20 см и менее объясняется повышенным нагревом «канала» протекающим через него током. Величина тока при приближении к острию увеличивается, так как у электрода собираются заряды со всей длины одиночного или ветвистого «канала». Диффузный «канал» по своим оптическим свойствам начинает приближаться к каналу слаботочной искры, для которой

характерно широкополосное излучение в видимой области спектра [2].

Искривление диффузного «канала» происходит, по-видимому, за счет развития изгибной неустойчивости, характерной для токового шнура [12]. Наибольшие изгибы наблюдаются у острия, где токи разряда в «канале» наибольшие. В подтверждение этой гипотезы можно привести следующие оценки.

Как показано в [12], инкремент развития изгибной неустойчивости γ плазменного шнура радиуса a имеет следующий порядок:

$$\gamma = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{B_\phi^2(a)}{2\mu_0\rho}},$$

где μ_0 – магнитная постоянная; $B_\phi(a)$ – величина магнитной индукции на поверхности плазменного шнура; ρ – плотность газа в шнуре. Из этой формулы с учетом выражения для магнитной индукции на поверхности цилиндра, в котором протекает ток I , можно получить оценку линейной скорости движения. Она оказывается одного порядка с альфвенской скоростью c_A :

$$v \approx \gamma a = \sqrt{\frac{B_\phi^2}{2\mu_0\rho}} = \frac{c_A}{\sqrt{2}} = \frac{I}{2\pi a} \sqrt{\frac{\mu_0}{2\rho}}.$$

Для тока $I = 10$ А, радиуса канала $a = 0,5$ мм и плотности $\rho = 1$ мг/см³ имеем характерную поперечную скорость движения канала при его изгибе $v \sim 2,5$ м/с. Именно такой порядок имеет скорость поперечного движения канала, которую можно оценить из рис. 4. На нем канал за время примерно 2 мс перемещается на 2–3 мм, т.е. со скоростью 1–2 м/с.

Заключение

Проведенные исследования подтверждают важную роль убегающих электронов и рентгеновского излучения в формировании коронного разряда в воздухе атмосферного давления. В данных экспериментах рентгеновское излучение было зарегистрировано при длительностях модулированного импульса напряжения 10 мс. В этих условиях обнаружен второй механизм генерации рентгеновского излучения, который обусловлен, как мы предполагаем, ускорением начальных электронов за счет быстрого изменения электрического поля в области около острия. В том числе эти электроны могут быть созданы за счет УФ- и ВУФ-излучения диффузных каналов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-00081_а.

1. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
2. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 736 с.
3. *Akshev Yu.S., Grushin M.E., Deryugin A.A., Napartovich A.P., Pan'kin M.V., Trushkin N.I.* Self-oscillations of a positive corona in nitrogen // J. Phys. D. 1999. V. 32, N 18. P. 2399–2409.

4. Афанасьев С.Б., Лаврентюк Д.С., Петрушенко И.Н., Стешков Ю.К. Некоторые особенности коронного разряда в воздухе // Ж. техн. физ. 2008. Т. 78, вып. 7. С. 30–34.
5. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Kostyrya I.D., Jiang H., Xu R., Rybka D.V., Yan P. Generation of Runaway Electrons and X-rays in Repetitive Nanosecond Pulse Corona Discharge in Atmospheric Pressure Air // Appl. Phys. Express. 2011. V. 4. 066001 (3 p).
6. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Kozyrev A.V., Yan P., Kozhevnikov V.Yu. Runaway electrons and X-rays from a corona discharge in atmospheric pressure air // New Journ. of Phys. 2011. V. 13. 113305. (20 p).
7. Козырев А.В., Кожевников В.Ю., Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Шутц Д.В. Излучение диффузного коронного разряда в воздухе атмосферного давления // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 1009–1017.
8. Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д., Рыбка Д.В. Пробой в воздухе атмосферного давления при наносекундной длительности импульса напряжения за счет убегающих электронов // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 1. С. 103–108.
9. Козырев А.В., Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Шутько Ю.В. Генерация мягкого рентгеновского излучения и его роль в развитии пробоя воздушного промежутка при повышенных давлениях // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 22. С. 26–33.
10. Орешкин Е.В., Баренгольц С.А., Орешкин В.И., Чайковский С.А. Характерная длина и время усиления лавины убегающих электронов в сильных электрических полях // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, № 13. С. 17–26.
11. Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф. Излучение в ВУФ-области спектра бинарных смесей аргона и гелия с ксеноном при диффузном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 226–229.
12. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977. § 10.5. С. 353.

D.V. Rybka, I.V. Andronikov, G.S. Evtushenko, A.V. Kozyrev, V.Yu. Kozhevnikov, I.D. Kostyrya, V.F. Tarasenko, M.V. Tregub, Yu.V. Shut'ko. Corona discharge in air at atmospheric pressure under modulated voltage pulse with a duration of 10 ms.

In atmospheric pressure air formation and decay of diffuse "channels" of corona discharge, as well as optical and X-ray radiation were investigated. Modulate pulses (~ 290 kHz) of high voltage (~ 250 kV) with duration of 10 ms was used. A soft X-ray radiation was obtained from corona discharge. In the area of diffuse "channel" and at a distance from the plasma channel the bright glowing points was registred. It was determined that on diffuse "channels" bends appear, the length of which is increased by the end of the pulse voltage.