

11.1

## Стенд для исследования радиоизлучения длинной электрической искры

© В.С. Сысоев<sup>1</sup>, Ю.А. Кузнецов<sup>1</sup>, М.Ю. Наумова<sup>1</sup>, А.И. Орлов<sup>1</sup>, Д.И. Сухаревский<sup>1</sup>,  
Н.М. Лепехин<sup>1</sup>, Н.Н. Швец<sup>1</sup>, Л.М. Макальский<sup>2</sup>, А.В. Кухно<sup>2</sup>, М.Е. Гуцин<sup>3</sup>, Е.А. Мареев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, ВНИЦ 900, Истра, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия

<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

E-mail: v.s.sysoev@vniitf.ru

Поступило в Редакцию 3 ноября 2021 г.

В окончательной редакции 7 февраля 2022 г.

Принято к публикации 7 февраля 2022 г.

На созданном стенде в лабораторных условиях смоделированы с помощью электрической искры в длинном воздушном промежутке различные фазы развития разряда, характерные для молнии. С помощью специальной радиоаппаратуры исследовано радиоизлучение длинной электрической искры. Получено, что на стадиях развития искрового разряда в длинном промежутке регистрируется радиоизлучение как минимум до частоты 1.4 GHz. Данные по радиоизлучению в этом диапазоне имеют большое практическое значение для таких областей, как радиосвязь (при грозовой активности), радиолокация, гронопеленгация.

**Ключевые слова:** длинная электрическая искра, разряд молнии, радиоизлучение, стримерный разряд, лидерный разряд, радиосвязь.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.08.52360.19070

Радиоизлучение из грозовых облаков является актуальным предметом исследований атмосферного электричества, поскольку имеет большое практическое значение для таких областей, как гронопеленгация, радиолокация, радиосвязь, в том числе в области сверхвысоких частот. В природных условиях радиоизлучение грозовых облаков исследуется давно. Однако технически такие исследования очень сложны, поэтому остаются не до конца выясненными механизмы, приводящие к радиоизлучению от разрядных процессов в грозовом облаке как на стадии его зарождения и развития, так и при распространении канала лидера молнии. В связи с этим проведение экспериментальных исследований в лабораторных условиях радиоизлучения длинной электрической искры как аналога разряда молнии предоставляет большие возможности.

Электрическую искру в длинном воздушном промежутке можно считать физической моделью молниевых разрядов. В своем развитии достаточно длинная искра имеет стадии, характерные для развития молнии в начальной фазе (при движении лидера в промежутке грозовое облако—земля, когда его стримерная зона находится еще далеко от земли, при достижении стримерной зоны лидера заземленного объекта) и на стадии обратного удара. Аналогично в длинной электрической искре возникают радиоизлучения, характерные для молнии. Источником радиоизлучения длинной искры (аналогично молниевому разряду) являются стримеры (стримерная зона лидера) и сам лидерный канал (в фазе развития свободного лидера и достижения его стримерной зоны

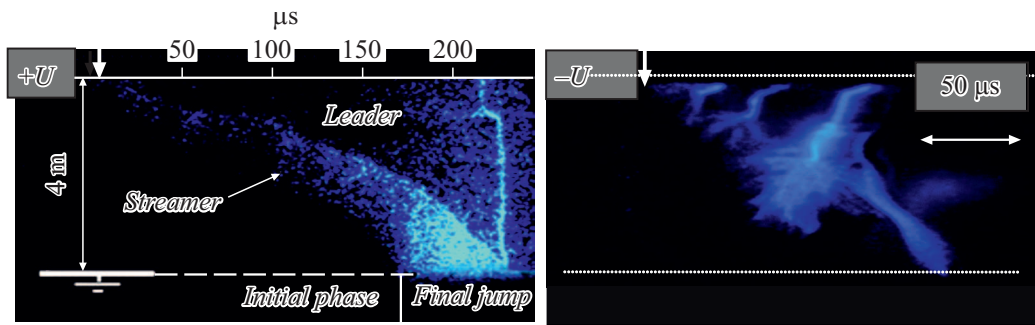
заземленного электрода), а также канал искрового разряда в фазе развития обратного удара.

При экспериментах по моделированию молниевых разрядов искровым в длинном воздушном промежутке все описанные фазы длинной искры должны быть достаточно четко выражены, т.е. параметры длинной искры должны соответствовать определенным критериям. Для этого воздушный межэлектродный промежуток должен иметь достаточную длину, а импульс напряжения, подаваемого на него от высоковольтного источника, иметь определенную форму.

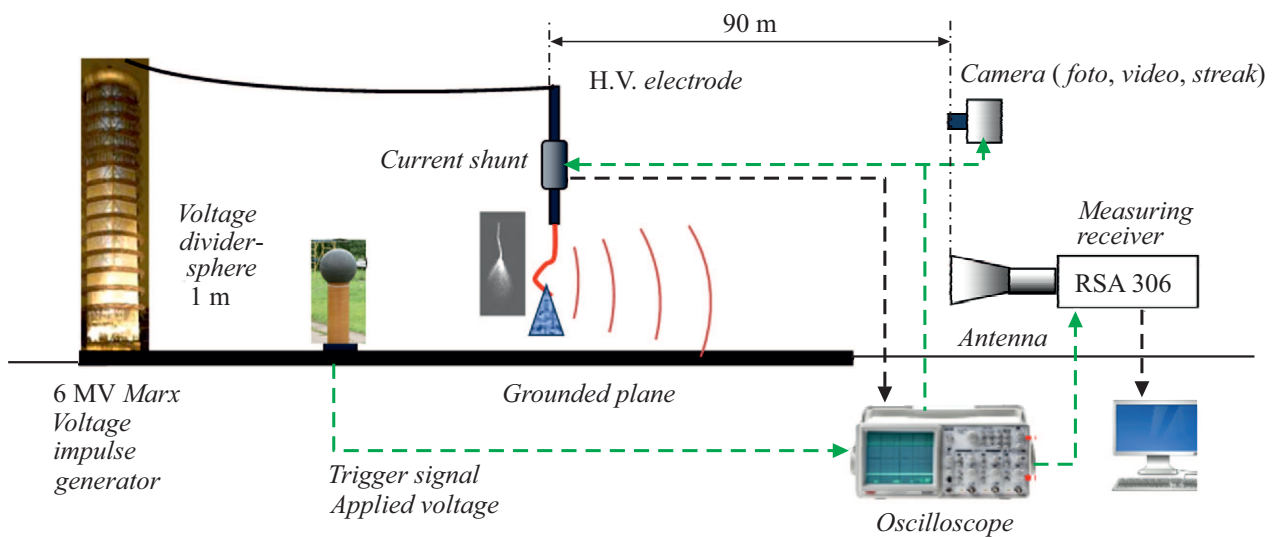
В работах [1,2] было экспериментально исследовано радиоизлучение от стримерных разрядов в мегагерцевом и гигагерцевом диапазонах при длине стримеров до 20 см. В [3–5] исследовалось радиоизлучение реальных грозовых облаков и молниевых разрядов. В [6] получено, что из разрядов в заряженной аэрозольной структуре (моделирующей грозовую ячейку) возникает радиоизлучение с частотой до 10 GHz.

Цель настоящей работы — описание созданного экспериментального стенда, позволяющего формировать многометровую электрическую искру с фазами разряда, характерными для лидера молнии, и проведенных измерений ее радиоизлучения в мега- и гигагерцевом диапазонах.

В данных экспериментальных исследованиях для формирования длинной электрической искры использовался высоковольтный генератор, выполненный по схеме Маркса, с напряжением на выходе до 6 MV. Генератор входит в состав уникальной научной установки [7] и расположен на открытой площадке в окружении леса.



**Рис. 1.** Развертки оптической картины развития разряда во времени в искровом промежутке стержень–плоскость длиной 4 м. Слева — положительная, справа — отрицательная полярность импульса напряжения.



**Рис. 2.** Общая схема испытательной установки с измерительными системами.

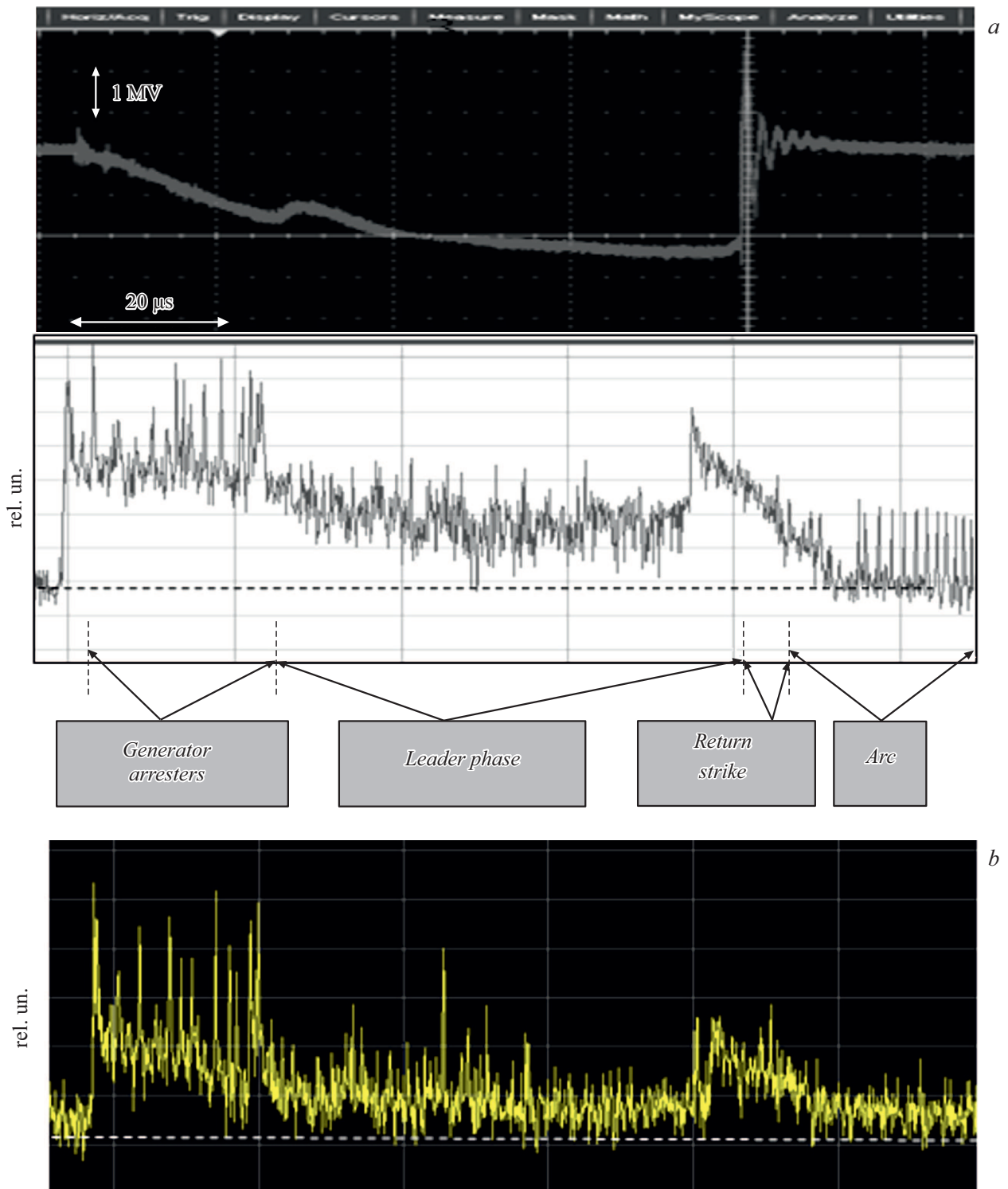
Установка предназначена как для проведения исследовательских работ в области физики молнии и молниезащиты, так и для тестовых испытаний по определению электрических характеристик изоляции установок высокого и сверхвысокого напряжения. Генератор позволяет получать искровые электрические разряды длиной до 50 м, моделирующие молниевый разряд. Измерительные системы установки позволяют проводить экспериментальные исследования параметров искровых разрядов и регистрировать их радиоизлучение в диапазоне до 6 GHz. Генератор Маркса в экспериментах имел следующие основные технические параметры: напряжение на выходе до 3 MV, запасаемая энергия до 0.6 MJ, выходная емкость 50 nF, фронт импульса 100  $\mu$ s, длительность импульса 7500  $\mu$ s. Высота конструкции генератора 45 м. Расстояние от него до разрядного промежутка стержень–плоскость составляло 50 м.

На рис. 1 приведены примеры развертки во времени оптической картины развития длинной искры положительной (левый снимок) и отрицательной (правый снимок) полярности, полученные с помощью стрик-камеры FER-14. Фотокадры стримерной зоны лидера при его

развитии в промежутке регистрировались с помощью скоростной видеокамеры 4 Picos с малым временем экспозиции. В экспериментах длина разрядного промежутка стержень–плоскость равнялась 4–6 м, к промежутку прикладывался импульс напряжения положительной или отрицательной полярности.

На рис. 2 представлены схемы измерительных систем, используемых в экспериментах. Измерение формы импульса производилось с помощью емкостного делителя напряжения (в виде шара диаметром 1 м, установленного на расстоянии 50 м от генератора). Значение амплитуды прикладываемого напряжения оценивалось по величине зарядного напряжения генератора и калибровалось с помощью известных из ранее полученных разрядных характеристик используемых импульсов напряжения (при данной длине фронта и длительности импульса).

Ток разряда на высоковольтном электроде (стержне) регистрировался с помощью малоиндуктивного омического шунта, осциллографа и аналого-цифрового преобразователя, сигнал с которого передавался по каналу Wi-Fi на регистрирующую аппаратуру на заземленной



**Рис. 3.** Осциллограммы радиоизлучения, зафиксированные измерительным приемником RSA 306 (ширина полосы 40 MHz) из длинной отрицательной искры в промежутке стержень—плоскость длиной 6 м. *a* — синхронные измерения радиоизлучения на частоте 300 MHz. Верхняя кривая — напряжение на промежутке, нижняя — осциллограмма радиоизлучения в разных фазах разряда. *b* — пример записи осциллограммы радиоизлучения разряда на частоте 1000 MHz. Цена деления развертки по времени 20 μs/div.

плоскости. Передача записи осциллограмм тока разряда с потенциального электрода осуществлялась по-

сле окончания разряда, что обеспечивало необходимую помехозащищенность при измерениях. Для фиксации

траектории разряда и его параметров в динамике использовались оптические средства диагностики (цифровой фотоаппарат, скоростная камера 4 Picos, стрик-камера FER 14), установленные в экранированной кабине на расстоянии 30 м от разрядного промежутка. Для регистрации радиоизлучения разряда на расстоянии 90 м от разрядного промежутка устанавливалась приемная антенна (рупорная или штыревая), к которой подключался измерительный приемник Tektronix RSA 306 (диапазон частот от 10 kHz до 6.2 GHz, полоса канала до 40 MHz). Для измерений в сверхвысокочастотном диапазоне использовалась рупорная антенна типа П6-23М с равномерной амплитудно-частотной характеристикой в полосе от 850 MHz до 17.44 GHz. Для регистрации сигналов на более низких частотах использовалась штыревая антенна длиной 1 м. Достаточно большое расстояние от приемных антенн до искрового разряда (90 м) обеспечивало проведение измерений в дальней зоне. Сигналы с измерительных систем тока и напряжения в промежутке подавались на вход цифрового запоминающего осциллографа Tektronix DPO 7104 с полосой 1 GHz. Синхронизация измерительных систем осуществлялась с помощью импульсного стандартного сигнала (TTL), формируемого цифровым осциллографом Tektronix DPO 7104. Запуск самого осциллографа происходил от сигнала с делителя напряжения, возникающего при срабатывании разрядников высоковольтного генератора.

В ходе экспериментов было проведено несколько десятков измерений радиоизлучения для отрицательной и положительной полярности импульсного напряжения генератора. Прием в мегагерцевом диапазоне осуществлялся на штыревую антенну. На сверхвысоких частотах радиоизлучение измерялось с помощью рупорной антенны. На рис. 3, а приведен пример измерений зависимости величины радиоизлучения на частоте 300 MHz (полоса канала 40 MHz) от времени при отрицательной полярности напряжения на разрядном промежутке. На рис. 3, б представлена запись радиоизлучения на частоте 1000 MHz.

Проведенные эксперименты показали, что верхняя граница спектра радиоизлучения в сверхвысокочастотном диапазоне достигает значений как минимум в 1.4 GHz. На более высоких частотах радиоизлучение в экспериментах не было зарегистрировано, возможно из-за недостаточной чувствительности измерительной системы. Получено, что в данном радиодиапазоне наиболее сильное излучение регистрируется на стадиях развития разряда, при которых формируется мощный стримерный процесс. Нижнюю границу спектра радиоизлучения (ниже 10 MHz) разряда в форме длинной искры при такой измерительной системе определить затруднительно из-за ограничений по диапазону штыревой антенны. Отметим, что в экспериментах источником тока в искре являлся импульсный генератор, нагруженный на разрядный контур — виток с характерными размерами 40 × 50 м. На частотах порядка 10 MHz и ниже электромагнитное поле, формируемое

переходными процессами и собственными колебаниями в крупномасштабном витке, не может рассматриваться независимо от поля излучения собственно разрядного промежутка, длина которого составляет не более 10% от характерных размеров разрядного контура.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что на созданном экспериментальном стенде с генератором длинной искры, работающим по схеме Маркса, возможно моделирование процессов, приводящих к генерации радиоизлучения молнии в различных фазах ее развития. Экспериментально показано, что на некоторых стадиях развития длинной электрической искры формируется радиоизлучение в диапазоне частот как минимум до 1.4 GHz. Полученные результаты согласуются как с опубликованными натурными данными по радиоизлучению молнии [4], так и с теоретическими расчетами [3] и измеренными параметрами радиоизлучения длинных стримеров [6].

### Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00501).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.С. Сысоев, Ю.А. Кузнецов, Д.И. Сухаревский, М.Ю. Наумова, Н.М. Лепехин, Л.М. Макальский, А.В. Кухно, в сб.: *XIII Междунар. конф. „Забайкальские научные чтения“* (Снежинск, Россия, 2019). <http://vniitf.ru/data/images/zst/2019/presents/sec-3/3-28ru-d.pdf>
- [2] Н.М. Лепехин, Ю.С. Присеко, В.Г. Филиппов, М.У. Булатов, Д.И. Сухаревский, В.С. Сысоев, Письма в ЖТФ, **41** (7), 96 (2015). [N.M. Lepekhin, Yu.S. Priseko, V.G. Filippov, M.U. Bulatov, D.I. Sukharevskii, V.S. Syssoev, Tech. Phys. Lett., **41** (4), 352 (2015). DOI: 10.1134/S1063785015040112].
- [3] F. Shi, N. Liu, J.R. Dwyer, K.M.A. Ihaddadene, Geophys. Res. Lett., **46** (1), 443 (2019). DOI: 10.1029/2018GL080309
- [4] V.A. Rakov, M.A. Uman, *Lightning: physics and effects* (Cambridge University Press, 2003).
- [5] Н.И. Петров, И.Н. Сисакян, Компьютерная оптика, № 13, 65 (1993). <https://cyberleninka.ru/article/n/izlucheniemoelniievogo-razryada>
- [6] M.E. Gushchin, S.V. Korobkov, I.Yu. Zudin, A.S. Nikolenko, P.A. Mikryukov, V.S. Syssoev, D.I. Sukharevsky, A.I. Orlov, M.Yu. Naumova, Yu.A. Kuznetsov, A.S. Belov, N.N. Shvets, E.A. Mareev, Geophys. Res. Lett., **48** (7), e2020GL092108 (2021). DOI: 10.1029/2020GL092108
- [7] [www.ckp-rf.ru/usu/73578/](http://www.ckp-rf.ru/usu/73578/)