

УДК 533.9.082.74

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

И. С. Байдин, А. А. Родионов,  
А. В. Огинов, К. В. Шпаков

*Описана методика локализации источника радиоизлучения гигагерцового диапазона, генерируемого сильноточным атмосферным искровым разрядом, с применением двух сверхширокополосных антенн. Определено пространственное расположение источников первых, наиболее высокочастотных, импульсов радиоизлучения в разрядном промежутке.*

**Ключевые слова:** радиоизлучение, триангуляция, атмосферный искровой разряд, стример, лидер.

В работах [1–3] авторы регистрируют импульсы радиоизлучения на частотах 1.5–1.6 и 2.4 ГГц, максимум мощности которых совпадает с моментом генерации рентгеновского излучения. Максимумы высокочастотного радиоизлучения и импульсы рентгеновского излучения наблюдались как в разрядах при нормальных условиях до протекания основного тока, так и в разрядах без пробоя (незавершенных разрядах), что может указывать на схожесть процессов их генерации. В работе [4] нами была представлена сверхширокополосная антенна, рассчитанная и смоделированная для применения в экспериментах по исследованию радиоизлучения, генерирующегося в начальной фазе искрового разряда. В [4] нами показано, что наиболее высокочастотная часть радиоспектра искрового разряда приходится на предпробойную стадию его развития. Времена генерации радиоизлучения на частотах 1–6 ГГц измеряются единицами наносекунд, и радиоизлучение регистрируется в виде нескольких всплесков.

В данной работе исследование генерации радиоизлучения проводится на установке ЭРГ, устройство и работа которой подробно представлены в [5–7]. Высоковольтный генератор импульсов напряжения (ГИН) позволяет подавать на высоковольтные электроды однократный импульс напряжения длительностью порядка 1 мкс с амплитудой

---

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: ivanbaidin@lebedev.ru.

до 1 МВ. Импульсное напряжение приложено к разрядному промежутку длиной 54 см между высоковольтным острым катодом (иглой) и анодом в виде полусферы радиусом 7.5 см. Разрядный промежуток располагается вдоль оси обратного токопровода (цилиндрической обечайки) диаметром 2 м.

В предположении о том, что источник радиоизлучения находится в горизонтальной плоскости, проходящей через ось исследуемого разряда, было оценено местоположение источника радиоизлучения методом триангуляции при помощи двух приемных антенн. Полученный с антенн сигнал регистрируется осциллографом LeCroy WM 8620A с полосой пропускания 6 ГГц. Частота дискретизации осциллографа позволяет сравнивать задержку между двумя каналами с точностью в 50 пс. В зависимости от области генерации излучения и местоположения приёмных антенн в плоскости разряда погрешность измерений местоположения источника радиоизлучения меняется от 5 до 15 см. Принципиальная работоспособность применяемого метода проверена в эксперименте, в результате которого были получены распределения местоположения источников высокочастотного радиоизлучения (рис. 1).

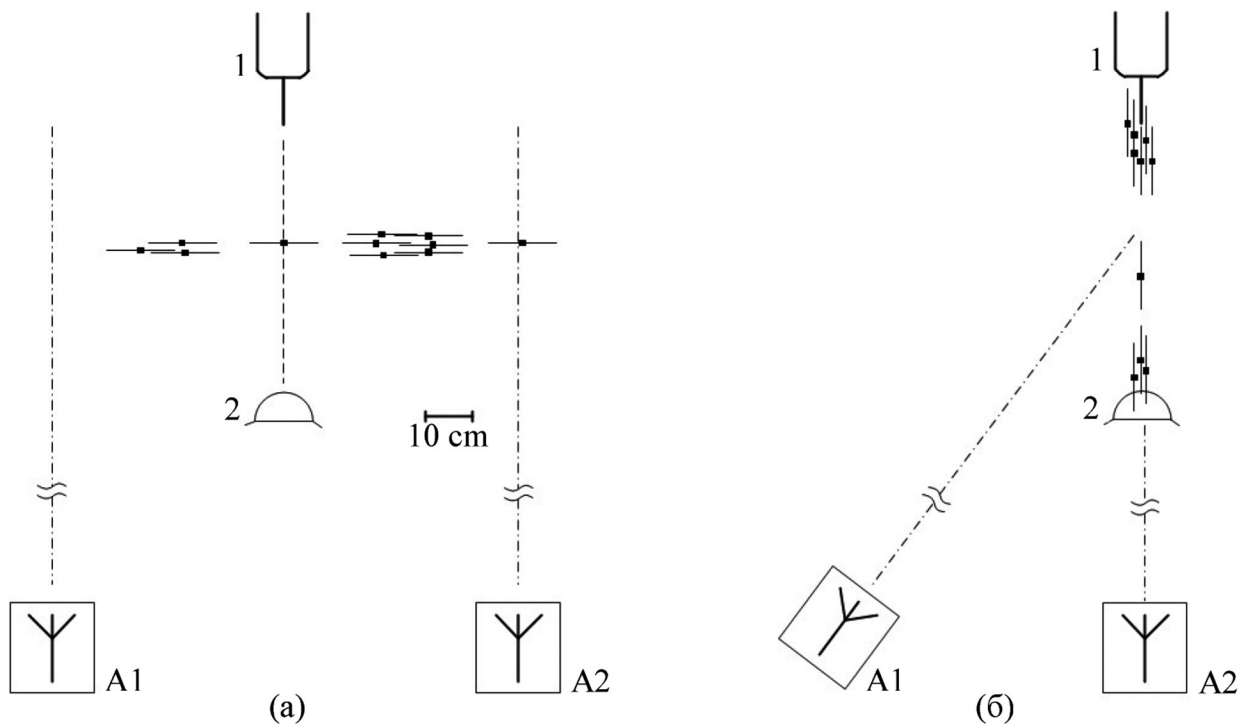


Рис. 1: Распределение источников радиоизлучения (а) в первой конфигурации, (б) во второй конфигурации. 1 – катод, 2 – анод, A1, A2 – антенны.

В первой конфигурации антенны  $A1, A2$  расположены симметрично относительно оси разряда на расстоянии 4.7 м от анода, расстояние между антеннами составляет 1 м (рис. 1(а)). На этом расстоянии они находятся в “дальней зоне” на всей полосе регистрируемых частот. Антенны ориентированы на середину разрядного промежутка. Данная конфигурация позволяет оценить расположение источника радиоизлучения по координате, перпендикулярной оси разряда с погрешностью 10–15 см, пренебрегая координатой вдоль оси разряда (рис. 1(а)).

Во второй конфигурации антенна  $A1$  расположена на расстоянии 1 м от антенны  $A2$ , размещенной на оси разряда на расстоянии 4.7 м от анода (рис. 1(б)), при этом обе антенны ориентированы в область разрядного промежутка. Данное расположение антенн, напротив, позволяет оценить расположение источника радиоизлучения по оси разряда, пренебрегая поперечной координатой. Погрешность измерений обусловлена, в первую очередь, малым углом между антеннами. Результаты сгруппированы по трем областям разряда – вблизи катода, вблизи анода и в центре промежутка. Полученное распределение представлено на рис. 1(б). Как правило, источник радиоизлучения находится вблизи электродов, на расстоянии 5–10 см.

Наиболее высокочастотная составляющая радиоизлучения приходится на стадию роста напряжения в разрядном промежутке. Формирующиеся на этой стадии первичные подкритические электронные лавины начинают ионизовать среду по пути своего прохождения. С нарастанием напряженности поля и накоплением пространственного заряда в приэлектродной области формируются и затем прорастают стримеры, из которых впоследствии при росте локальной проводимости и их эволюции в разрядном про-

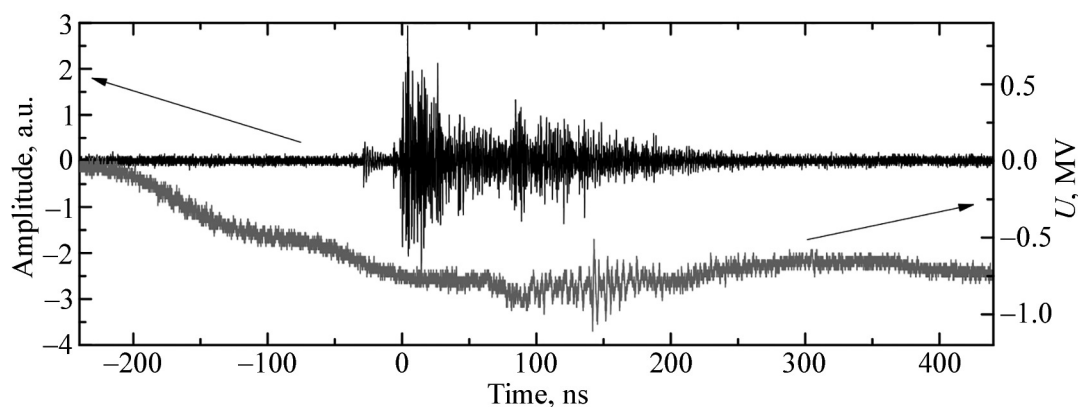


Рис. 2: Типичный сигнал, принимаемый антенной (слева, черный), импульс напряжения, приложенный к разрядному промежутку с ГИН (справа, серый).

межутке формируется лидер разряда [8–10]. Отметим, что при переходе к стримерно-лидерной стадии амплитуда радиоизлучения резко возрастает, но уменьшается вклад излучения с частотой более 2 ГГц (рис. 2). Поэтому источники радиоизлучения методом триангуляции можно локализовать по первому регистрируемому импульсу отдельно на стадии электронных лавин и на стадии формирования стримеров.

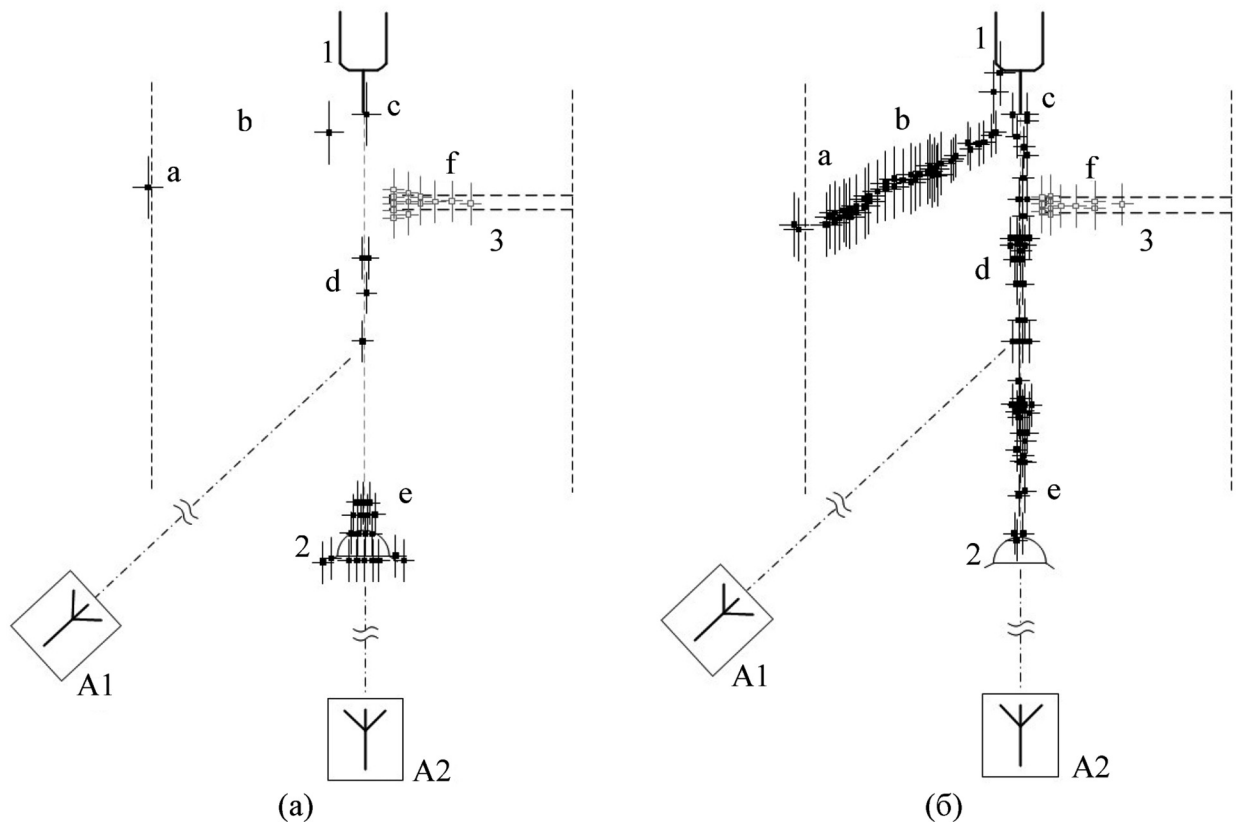


Рис. 3: Расположение источников радиоизлучения: (а) в первом импульсе на стадии развития лавин электронов ( $t < 0$ ), (б) на стадии формирования стримеров ( $t \geq 0$ ). 1 – катод, 2 – анод, 3 – торцевой фланец обечайки, A1, A2 – антенны а–f – области генерации излучения (подробнее в табл. 1).

Для уточнения результатов и получения лучшего пространственного разрешения поставлена серия экспериментов, насчитывающая 115 событий (см. рис. 3). Антенны ориентированы на середину разрядного промежутка, и находятся от него на расстоянии в 1.6 м (A1) и 2.7 м (A2). Обработка зарегистрированных импульсов проведена в предположении, что источники радиоизлучения находятся либо в горизонтальной плоскости разряда, либо на внутренней поверхности цилиндра обратного токопровода (обе-

чайки). В 57% зарегистрированных событий наблюдалось отчетливое разделение высокочастотного радиоизлучения на два типа: первый – на стадии ионизации промежутка электронными лавинами (рис. 3(а)), второй – на стадии формирования и развития стримеров (рис. 3(б)). Погрешность измерений обусловлена факторами, описанными выше, и меняется от 5.5 до 11 см, в зависимости от области генерации радиоизлучения. Также присутствует погрешность метода измерений, связанная с возможной генерацией радиоизлучения вне исследуемой плоскости разряда.

Источники высокочастотного радиоизлучения можно сгруппировать по различным областям генерации ( $a-f$ , см табл. 1). Отмечено, что излучение, регистрируемое на стадии развития электронных лавин, обычно генерируется (73 из 80 случаев) на анодной полусфере и в области торцевого фланца обечайки. Под каждым событием мы имеем в виду радиоизлучение отдельного, нового разряда в идентичных условиях. На стадии формирования и развития стримеров радиоизлучение наблюдается в основном в разрядном промежутке на расстоянии 10–15 см от электродов, а не вблизи их поверхности. Часть событий исключена из выборки по причине отсутствия однозначного соответствия между импульсами, регистрируемыми антеннами A1 и A2 (наложения, множественная генерация, малое соотношение сигнал/шум).

Т а б л и ц а 1

*Классификация источников радиоизлучения по 115 разрядам*

	Области локализации импульсов радиоизлучения	Лавинная стадия, кол-во событий	Стримерная стадия, кол-во событий
a	Вблизи обратного токопровода (обечайки)	1	18
b	Между обечайкой и катодом	1	22
c	Прикатодная область (игла)	1	9
d	Разрядный промежуток игла-полусфера	4	40
e	Прианодная область (полусфера)	52	5
f	Правая часть торцевого фланца обечайки	21	12
	Исключены из выборки	35	9

Таким образом, в работе представлены результаты трех серий экспериментов, направленных на локализацию источника радиоизлучения сантиметрового диапазона,

формирующегося в начальной фазе искрового разряда. Полученные результаты согласуются с теоретическими предположениями и результатами, полученными другими диагностиками. Показано, что источники высокочастотного радиоизлучения на разных стадиях развития искрового разряда генерируются в различных областях разрядного промежутка. На лавинной стадии источники обычно локализуются в области анода, на стадии формирования и развития стримеров в разрядном промежутке на расстоянии 10–15 см от электродов. Комплексное исследование этого явления в будущем позволит лучше понять фундаментальные процессы, протекающие на начальной стадии разряда.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 20-08-01156.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. Petersen and W. Beasley, *Atmos. Res.* **135**, 314 (2014). DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.02.006.
- [2] J. Montanyá, F. Fabró, V. March, et al., *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **136**, 94 (2015). DOI: 10.1016/j.jastp.2015.06.009.
- [3] P. Kochkin, J. Montanya, and V. March, *High Pressure Gases Techniques and Measurements* **1**, 157 (2016).
- [4] И. С. Байдин, А. В. Огинов, Е. В. Паркевич, *ЖТФ* **91**(12), 1912 (2021).
- [5] С. А. Чайковский, А. В. Огинов, К. В. Шпаков и др., *Изв. Высших Учебных Заведений. Физика* **58**(9/2), 258 (2015). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3c79
- [6] A. V. Agafonov, A. V. Oginov, A. A. Rodionov, et al., *Plasma Sources Science and Technology* **28**(9), 095014 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3c79.
- [7] A. V. Agafonov, V. A. Bogachenkov, A. P. Chubenko, et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50**(16), 165202 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa5dba.
- [8] D. Petersen, M. Bailey, W. H. Beasley, and J. Hallett, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **113**, D17 (2008). DOI: 10.1029/2007JD009036.
- [9] I. M. Kutsyk and L. P. Babich, *Plasma Physics Reports* **47**(3), 251 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21030089.
- [10] V. Cooray, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **136**, 39 (2015). DOI: 10.1016/j.jastp.2015.09.008.

Поступила в редакцию 30 июля 2021 г.

После доработки 1 октября 2021 г.

Принята к публикации 2 октября 2021 г.