04

Связь осцилляций электрического тока и СВЧ-излучений в начальной стадии высоковольтного протяженного атмосферного разряда

© П.А. Старовойтова, И.С. Байдин, А.В. Огинов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
E-mail: p.starovoitova@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 29 июня 2026 г.
В окончательной редакции 13 июля 2026 г.
Принято к публикации 13 июля 2026 г.

Исследована связь между всплесками СВЧ-излучения и токовыми осцилляциями при импульсном пробое воздушного промежутка длиной 50 cm. Установлено устойчивое опережение СВЧ-излучения относительно осцилляций сигнала на анодном шунте, средняя величина которого составляет около 4 ns. Показано, что наблюдаемая задержка значительно меньше характерного времени распространения стримерной структуры через весь межэлектродный промежуток и не связана с формированием сквозного проводящего канала. Предполагается, что СВЧ-излучение возникает на предпробойной стадии вследствие локальных быстрых изменений тока и распределения заряда в области взаимодействия стримерных структур, тогда как сигнал на анодном шунте определяется более поздним интегральным электродинамическим откликом разрядной системы, включая ток смещения.

Ключевые слова: радиоизлучение, атмосферный искровой разряд, высокочастотные токовые осцилляции, мегавольтный разряд, молния.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.21.63658.20824

Исследование длинных атмосферных и лабораторных разрядов остается актуальной задачей в связи с проблемами физики молнии, импульсной энергетики, пробоя воздушных промежутков [1]. Особую значимость эти исследования приобретают в контексте генерации радиопомех в широком диапазоне частот, включая перспективные диапазоны мобильной связи (5G/6G) [2], а также задач мониторинга грозовой активности и воздействия молнии на объекты электроэнергетической инфраструктуры [3]. Протяженные искровые каналы метрового масштаба в свою очередь рассматриваются как удобная модель для изучения быстропротекающих процессов, характерных для природных атмосферных разрядов [4–6].

Показано, что в протяженных атмосферных разрядах наблюдаются интенсивные токовые осцилляции, тормозное рентгеновское излучение, а также электромагнитное излучение от высокочастотного до сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона [7–11]. В лабораторных экспериментах и исследованиях молнии зарегистрированы всплески радиоизлучения, связанные с предпробойной стадией и быстрыми изменениями тока в канале разряда [8,9,12]. Вместе с тем временна́я связь между СВЧ-всплесками и сигналами тока на ранней стадии развития длинного разряда изучена недостаточно. В частности, остается открытым вопрос, связаны ли микроволновые импульсы с локальными предпробойными процессами в плазме или с более поздним формированием интегрального токового отклика системы.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение относительной временно́й задержки между всплесками СВЧ-излучения и осцилляциями сигнала на анодном шунте при пробое протяженного воздушного промежутка, а также обсуждение возможной физической природы наблюдаемого запаздывания.

Представленные результаты экспериментов по пробою протяженных воздушных промежутков выполнены на импульсной высоковольтной установке электронно-релятивистского генератора (ЭРГ), использующей в качестве источника напряжения генератор импульсных напряжений, собранный по схеме Аркадьева–Маркса (рис. 1). Установка способна генерировать импульсы напряжения отрицательной полярности амплитудой до 1 MV со временем нарастания импульса около 200 ns и длительностью импульса напряжения порядка 1 μs. Установка размещалась в закрытом помещении при стабильных комнатных температуре и влажности, что позволило обеспечить повторяемость характеристик формируемого высоковольтного импульса. Мегавольтный импульс прикладывался к открытому разрядному промежутку, заполненному атмосферным воздухом при нормальных условиях. Электродная система имела аксиально-симметричную геометрию: внешний заземленный токопровод, катод из нержавеющей стали в виде обратного конуса с осевым острием (иглой) и анод в виде полусферы из проволочной сетки. В экспериментах регистрировались время СВЧ-вспышки, излучаемой разрядом, и ток с анодного шунта; временно́е разрешение диагностик не превышало 1 ns. С подробным описанием генератора импульсных напряжений и комплекса диагностического оборудования можно ознакомиться в работе [13].

На вставке к рис. 1 приведены типичные осциллограммы напряжения и тока на предпробойной стадии

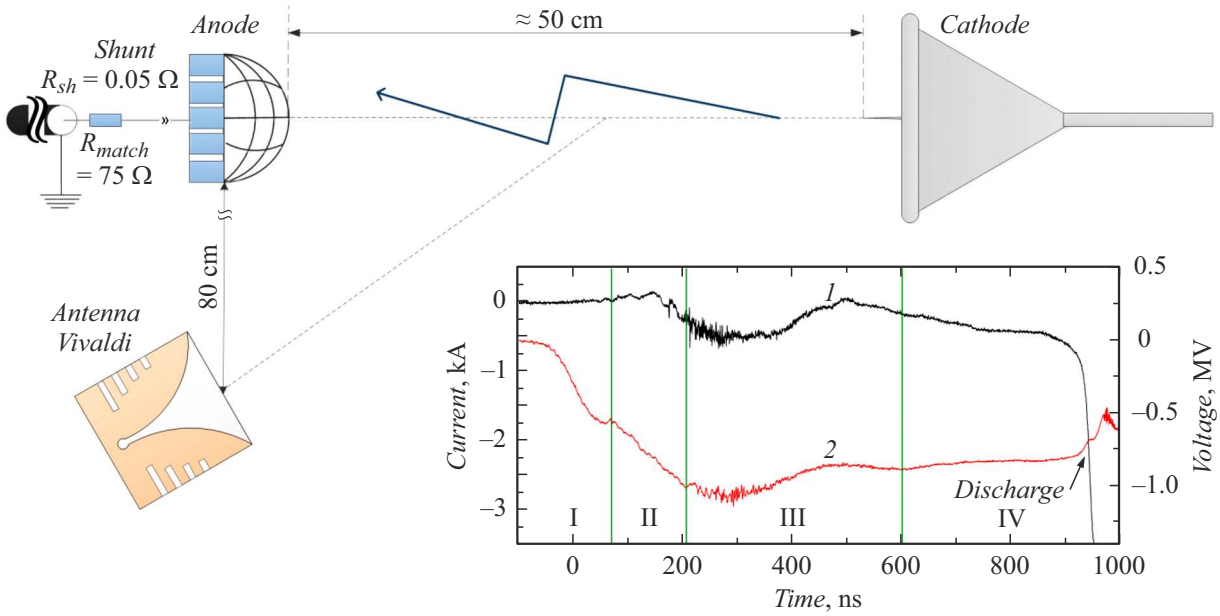


Рис. 1. Схема электродной системы и типовой сигнал, полученный с установки ЭРГ.

разряда. Линией *1* обозначена кривая тока, линией *2* — напряжение на разрядном промежутке. Вертикальными линиями разделены последовательные этапы развития предпробойной стадии разряда, обозначенные римскими цифрами, которые определяются по изменению производной кривой напряжения. Начало промежутка II приходится на локальный экстремум производной приложенного напряжения dU/dt, а промежутка III — на момент изменения знака или скорости спада этой производной, что указывает на смену режима стримерной активности. Детальнее выделенные этапы описаны в [14].

На рис. 2 представлены следующие графики: первый сверху — график напряжения от 100 до 300 ns в разрядном промежутке, второй — напряжение на антенне Вивальди, третий — ток на шунте анодного токопровода. Видно, что на верхнем графике СВЧ-излучение и токовые осцилляции приходятся на стадию II предымпульса разряда, когда напряжение растет от 0.5 до 1 MV. Более детально это рассмотрено в [14]. На среднем и нижнем графиках цифрами *1* и *2* обозначены локальные экстремумы, времена которых были учтены для разрешения вопроса синхронизации СВЧ-излучения и токовых осцилляций. Графики приведены с учетом кабельных и приборных задержек. Погрешность измерений не превышает 300 ps. Данный метод был опробован и подробно описан в [15].

Анализ 110 независимых разрядов, у которых можно было определить локальные экстремумы, показал, что существует разница между временами всплесков СВЧ-излучений и токовых осцилляций. Она составляет задержку более чем в 1 ns. Однако, как видно на рис. 1, анодный шунт находится на 80 cm ближе, соответственно сигнал на него должен приходить на ≈ 3 ns раньше, чем на антенну, вследствие этого суммарная разница во времени составляет ≈ 4 ns. На рис. 3 приведена гистограмма временны́х задержек токовых осцилляций относительно времени появления СВЧ-излучения с уже учтенной постоянной задержкой, обусловленной геометрией. Формирование стримеров в разряде происходит стохастически, микронеоднородности на поверхности электрода, пылевые частицы или локальные флуктуации поля приводят к тому, что старт стримера происходит с разбросом по координате. Это меняет путь, который проходят токовые структуры до момента генерации СВЧ-импульса, что дает вариации задержки в единицы наносекунд. Оценочно характерное время распространения стримерной волны ионизации в разрядном промежутке длиной ≈ 50 cm, направленной от катода, составляет порядка 100–200 ns, тогда как для стримеров, распространяющихся со стороны анода, оно гораздо меньше (около 10–30 ns). Таким образом, наблюдаемая величина задержки существенно меньше характерных времен развития стримерных структур с обеих сторон разрядного промежутка.

Антенна регистрирует электромагнитное излучение, возникающее при быстрых локальных изменениях токов и пространственного распределения заряда в разрядном промежутке. Наблюдаемое опережение СВЧ-сигнала относительно осцилляций на анодном шунте указывает на то, что источник излучения формируется на предпробойной стадии разряда, до возникновения сквозного проводящего канала между электродами. В близких условиях эксперимента ранее было показано, что при отрицательной полярности напряжения источник СВЧ-излучения локализуется вблизи катода на расстоянии 10–20 cm [12]. Это свидетельствует о простран-

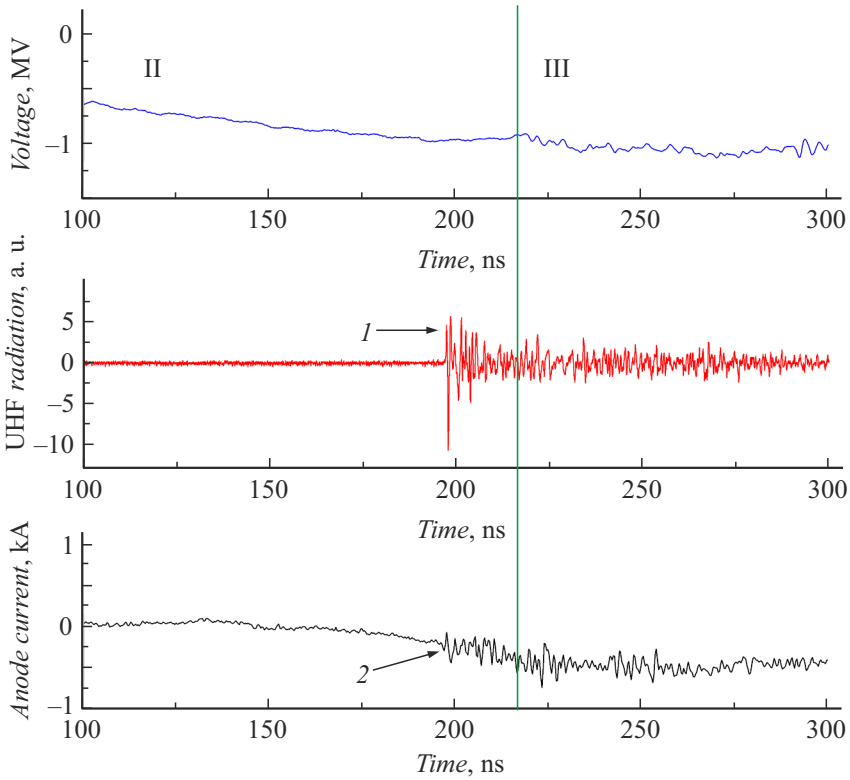


Рис. 2. Электрофизические параметры разряда.

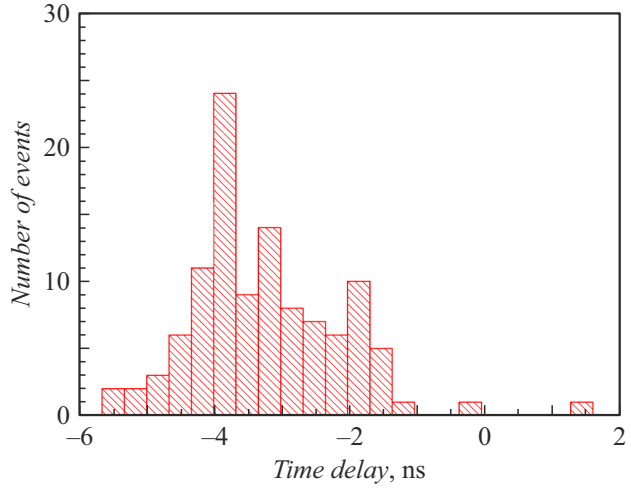


Рис. 3. Гистограмма временны́х задержек токовых осцилляций относительно времени появления СВЧ-излучения.

ственно неоднородном характере генерации излучения и его связи с ранними стадиями развития стримерных структур.

Одним из возможных механизмов генерации СВЧ-излучения являются резкие пространственно-временны́е неоднородности тока, возникающие в областях взаимодействия встречных волн ионизации. Такие процессы сопровождаются большими значениями dI/dt и являются эффективным источником электромагнитного излучения. Задержка СВЧ-излучения объясняется временем, необходимым для возбуждения плазменных колебаний и электромагнитных мод релятивистскими электронными сгустками. СВЧ-сигнал может быть результатом релаксации энергетического импульса плазмы, что также приводит к его временно́му запаздыванию. Поскольку до полного пробоя промежутка в рассматриваемый момент остается порядка сотен наносекунд, осцилляции сигнала на анодном шунте не могут быть отнесены к току проводимости через сформированный плазменный канал. В этих условиях разрядная система может рассматриваться как распределенная емкостно-индуктивная структура, в которой быстрые изменения поля индуцируют ток смещения во внешней цепи.

Таким образом, наблюдаемая задержка, приблизительно равная 4 ns, может быть обусловлена различием между локальным механизмом генерации СВЧ-излучения и более поздним интегральным электродинамическим откликом разрядной системы. Предлагаемая интерпретация требует дальнейшей экспериментальной проверки с использованием методов пространственной локализации источников излучения.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 23-19-00524-П).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S. Ardila, J. Montanyà, J. López, G. Solà, A. Roncancio, Electr. Power Syst. Res., **251**, 112334 (2026). DOI: 10.1016/j.epsr.2025.112334

[2] M.H.M. Sabri, M.R. Ahmad, M.A.M.N. Azami, M.Z.A. Aziz, Y. Takayanagi, T. Morimoto, S.A.S. Baharin, Measurement, **256** (Part D), 118418 (2025). DOI: 10.1016/j.measurement.2025.118418

[3] J. Montanyà, J.A. López, O. van der Velde, G. Solà, D. Romero, C. Morales, S. Visacro, M.M.F. Saba, S.J. Goodman, E. Williams, M. Peterson, Electr. Power Syst. Res., **213**, 108730 (2022). DOI: 10.1016/j.epsr.2022.108730

[4] Ю.П. Райзер, *Физика газового разряда* (Интеллект, Долгопрудный, 2009).

[5] M.A. Uman, *The lightning discharge* (Academic Press, Orlando, 1987).

[6] U. Ebert, C. Montijn, T.M.P. Briels, W. Hundsdorfer, B. Meulenbroek, A. Rocco, E.M. van Veldhuizen, Plasma Sources Sci. Technol., **15** (2), S118 (2006). DOI: 10.1088/0963-0252/15/2/S14

[7] J.R. Dwyer, H.K. Rassoul, Z. Saleh, M.A. Uman, J. Jerauld, J.A. Plumer, Geophys. Res. Lett., **32** (20), L20809 (2005). DOI: 10.1029/2005GL024027

[8] D. Petersen, W. Beasley, Atmos. Res., **135**, 314 (2014). DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.02.006

[9] J. Montanyà, O. van der Velde, D. Romero, V. March, G. Solà, N. Pineda, J. Bech, S. Soula, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., **136**, 94 (2015). DOI: 10.1016/j.jastp.2015.06.009

[10] P.O. Kochkin, C.V. Nguyen, A.P.J. van Deursen, U. Ebert, J. Phys. D, **45** (42), 425202 (2012). DOI: 10.1016/j.atmosres.2013.02.006

[11] N. Østgaard, B.E. Carlson, R.S. Nisi, T. Gjesteland, Ø. Grøndahl, A. Skeltved, N.G. Lehtinen, A. Mezentsev, M. Marisaldi, P. Kochkin, J. Geophys. Res. Atmos., **121** (6), 2939 (2016). DOI: 10.1002/2015JD024394

[12] E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov, I.S. Baidin, K.V. Shpakov, D.V. Tolbukhin, A.A. Rodionov, Y.K. Bolotov, V.A. Ryabov, S.A. Ambrozevich, A.V. Oginov, Phys. Rev. E, **108** (2), 025201 (2023). DOI: 10.1103/PhysRevE.108.025201

[13] E.V. Parkevich, K.V. Shpakov, I.S. Baidin, A.A. Rodionov, A.I. Khirianova, Y.K. Bolotov, V.A. Ryabov, J. Appl. Phys., **136** (17), 174901 (2024). DOI: 10.1063/5.0231084

[14] А.А. Родионов, А.В. Агафонов, В.А. Рябов, К.В. Шпаков, И.С. Байдин, Я.К. Болотов, М.А. Медведев, Е.В. Паркевич, А.Г. Мозговой, А.В. Огинов, Кр. сообщ. по физике ФИАН, № 7, 38 (2022). [A.A. Rodionov, A.V. Agafonov, V.A. Ryabov, K.V. Shpakov, I.S. Baidin, Ya.K. Bolotov, M.A. Medvedev, E.V. Parkevich, A.G. Mozgovoi, A.V. Oginov, Bull. Lebedev Phys. Inst., **49** (7), 221 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622070077].

[15] И.С. Байдин, А.В. Огинов, Е.В. Паркевич, А.И. Хирьянова, К.В. Шпаков, Письма в ЖТФ, **50** (18), 32 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.18.58627.19947 [I.S. Baidin, A.V. Oginov, E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, K.V. Shpakov, Tech. Phys. Lett., **50** (9), 76 (2024). DOI: 10.61011/TPL.2024.09.59161.19947].