

04

Спектральные характеристики СВЧ-излучения высоковольтного протяженного атмосферного разряда на основе вейвлет-анализа

© П.К. Батраков, И.С. Байдин, А.А. Родионов, А.В. Огинов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

E-mail: p.batrakov@lebedev.ru

Поступило в Редакцию 11 августа 2025 г.

В окончательной редакции 25 сентября 2025 г.

Принято к публикации 28 сентября 2025 г.

Искровой разряд на предпробойной стадии является источником мощных СВЧ-импульсов. Для частотно-временной локализации высокоамплитудных всплесков использовалось вейвлет-преобразование Морле. С целью количественного описания динамики сигналов применена экспоненциальная аппроксимация, позволившая определить ключевые параметры: начальную амплитуду α и темп затухания β . По результатам обработки экспериментальных данных выделены две группы всплесков, различающиеся характером затухания. Проведен статистический анализ, который выявил расхождение распределений коэффициентов с нормальным законом, что подтверждает стохастическую природу процессов. Результаты работы способствуют более глубокому пониманию механизмов генерации СВЧ-излучения в электроразрядных системах.

Ключевые слова: вейвлет-анализ, радиоизлучение, атмосферный искровой разряд, стример.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.03.62177.20469

Исследование сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов, сопровождающих атмосферные электрические разряды, является актуальной задачей, представляющей фундаментальный интерес для физики газоразрядных процессов, а также имеющей практическую значимость [1,2]. В современных исследованиях, включающих экспериментальную регистрацию СВЧ-сигналов при наблюдении атмосферных разрядов в природных и лабораторных условиях, а также численное моделирование, выдвинуто предположение, что импульсное СВЧ-излучение возникает в результате столкновений встречно направленных стримеров. Предполагается, что при данном явлении формируются области с высокими электрическими полями, в которых возможны быстрые переключения тока, способные генерировать микроволновое излучение [3–5].

Предполагается, что в разрядном промежутке в области взаимодействия встречно направленных стримерных корон образуются пучково-плазменные неустойчивости, где микроразряды выступают в качестве механизма разрядки этих неустойчивостей [6], причем этот процесс может развиваться не одномоментно, а затухать во времени, генерируя повторяющиеся импульсы радиоизлучения. Несмотря на наличие теоретических и экспериментальных исследований, временные характеристики СВЧ-сигналов, возникающих при столкновении встречно направленных стримеров, остаются недостаточно изученными.

В настоящей работе предлагается подход к анализу временной структуры СВЧ-сигналов, возникающих в атмосферных разрядах, инициируемых с помощью экспериментальной установки, разработанной для изучения протяженного искрового разряда в воздухе. Установка обеспечивает возможность формирования искровых разрядов метрового масштаба при напряжении поряд-

ка 1.2 MV [7]. Масштаб установки, электрофизических параметров разряда и диагностического оборудования позволяет разрешать во времени отдельные события на стадии взаимодействия встречно направленных стримерных корон, каждое из которых происходит на временах порядка 1 ns. Для анализа СВЧ-сигналов предлагается применение подхода с использованием вейвлет-анализа, который позволил локализовать временные и частотные параметры СВЧ-сигнала. Основным результатом работы является идентификация характерных структур в сигнале, а также разработка методики их описания с использованием аппроксимации экспоненциальными функциями.

Непрерывное вейвлет-преобразование (continuous wavelet transform, CWT) — это эффективный метод анализа нестационарных СВЧ-сигналов:

$$W_{\psi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (1)$$

Оно позволяет одновременно исследовать частотные и временные характеристики сигнала, проецируя его на семейство функций, полученных масштабированием и сдвигом материнского вейвлета ψ [8,9]. В формуле (1) a — параметр масштаба, определяющий частотную разрешающую способность, b — параметр временного сдвига, а ψ^* — комплексно-сопряженная функция материнского вейвлета [8,9].

Для анализа СВЧ-сигнала применялся вейвлет Морле, который является эффективным инструментом для анализа, поскольку обеспечивает высокое частотно-временное разрешение за счет узкополосной структуры и экспоненциально модулированной формы. Его

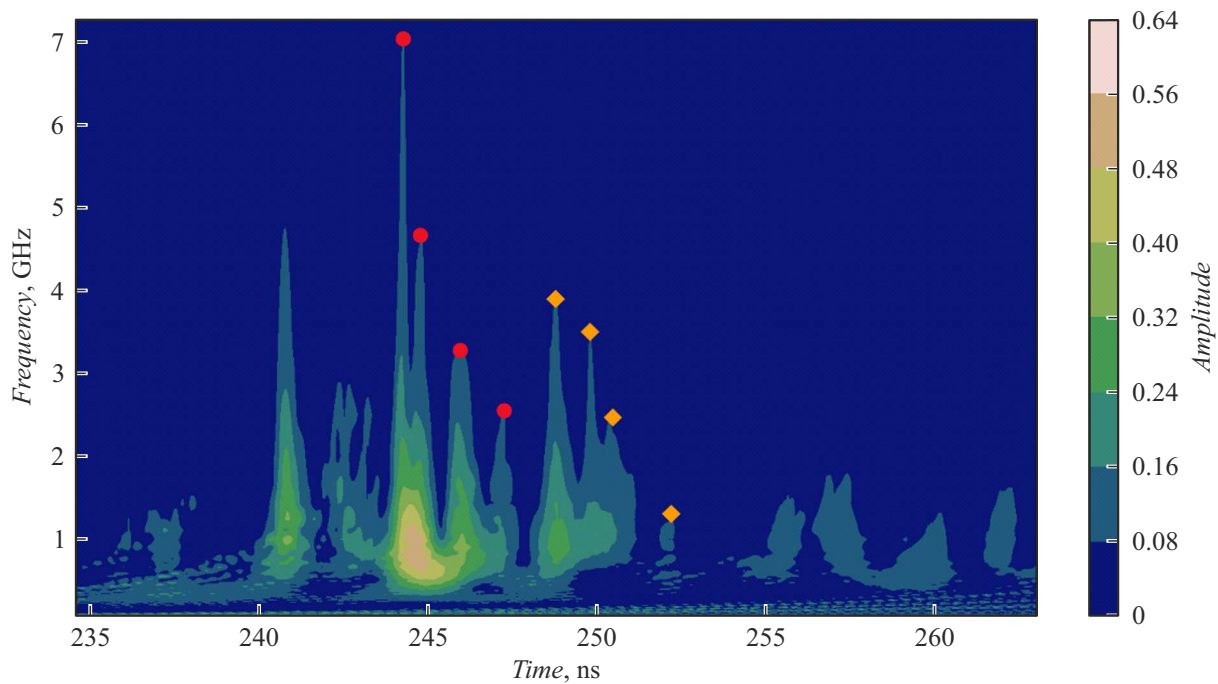


Рис. 1. Скалограмма участка СВЧ-сигнала с выраженными пиками высокочастотного сигнала. Отмеченные точки соответствуют частотным максимумам, использованным для аппроксимации затухающего сигнала. Символами обозначены различные затухающие объекты: первая группа событий отмечена кружками, вторая группа событий отмечена ромбами.

близость к гармоническим колебаниям делает данный вейвлет оптимальным для выявления и локализации высокочастотных компонент в нестационарных процессах

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (2)$$

где ω_0 — центральная частота. Скалограммы, полученные с использованием вейвлета Морле (рис. 1), демонстрируют четко выраженные всплески высокочастотного излучения, локализованные как по времени, так и по частоте. Отмеченные точки соответствуют максимальным частотам компонент сигнала, которые определяют спектральную ширину в каждый момент времени. Эти частотные максимумы могут рассматриваться как узлы для дальнейшей аппроксимации.

Исследование направлено на проверку гипотезы о свойствах вспыхивающих структур (пиков), возникающих при столкновении встречно направленных стримеров на предпробойной стадии искрового разряда. Согласно гипотезе, частотно-временные параметры всплесков допускают аппроксимацию экспоненциальной функцией

$$f(t) = \alpha e^{-\beta t}, \quad (3)$$

где α — амплитуда аппроксимирующей функции, которая определяется спектральной шириной первого пика в каждой группе точек на скалограмме, β — коэффициент затухания, характеризующий скорость уменьшения амплитуды во времени.

Для регистрации СВЧ-излучения от разряда использовались сверхширокополосные антенны Вивальди, ра-

ботающие в сантиметровом диапазоне и обеспечивающие прием в диапазоне выше 1 GHz. Антенны были установлены на расстоянии 3 м от лабораторной искры. Радиосигнал от антенны регистрировался осциллографом LeCroy WM 8620A с полосой пропускания 6 GHz. Передача радиосигнала до регистрирующей аппаратуры осуществляется по коаксиальному кабелю марки SF-141 FER длиной 3 м. На входе осциллографа установлены высокочастотные аттенюаторы с пропусканием до 18 GHz при КСВ (коэффициент стоячей волны) < 1.35 и затуханием 20 dB, более подробное описание схемы установки представлено в работах [10,11].

В настоящей работе основной интерес представляет начальная фаза протяженного высоковольтного разряда. Именно на этом этапе наблюдаются интенсивная генерация широкополосного радиоизлучения в диапазонах высоких и сверхвысоких частот, активное размножение многочисленных стримеров противоположной полярности, а также всплески мощности излучения, достигающие характерных частот в пределах 1–6 GHz (рис. 2). Важным признаком этой стадии является достижение максимальных значений напряжения в разрядном промежутке, что коррелирует с началом эмиссии высокочастотного радиоизлучения. Хронология развития разряда описана в [12].

Анализ частотно-временных характеристик СВЧ-сигнала показывает, что форма наблюдаемых всплесков на скалограмме (рис. 1) может быть корректно описана экспоненциальной зависимостью (формула (3)). Для иллюстрации метода на скалограмме выделены две

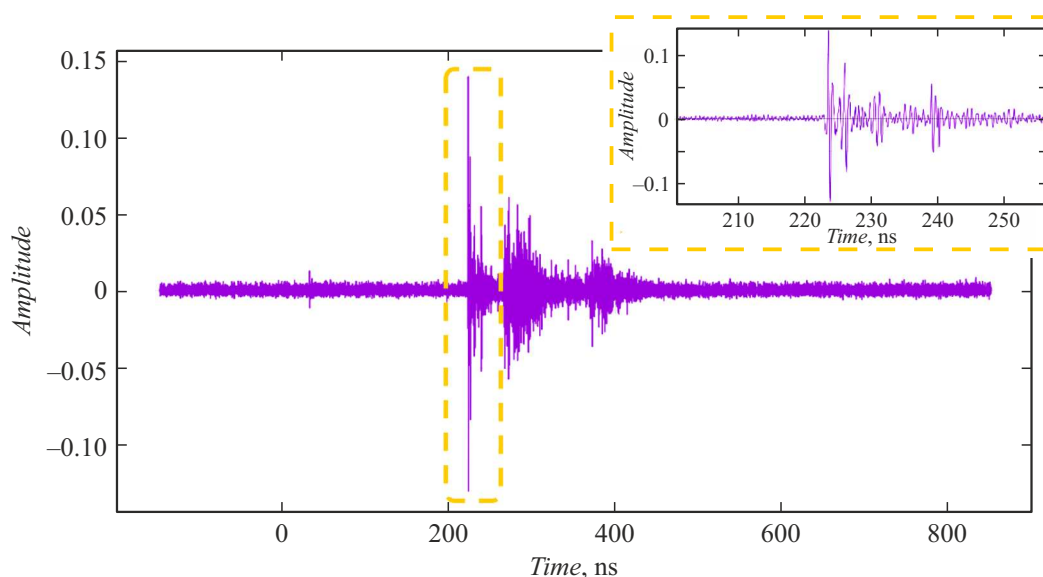


Рис. 2. Восстановленный сигнал в диапазоне 1–6 GHz, полученный с использованием вейвлет-преобразования. Исследуемый временной участок СВЧ-сигнала выделен штриховой линией и соответствует предпробойной стадии искрового разряда.

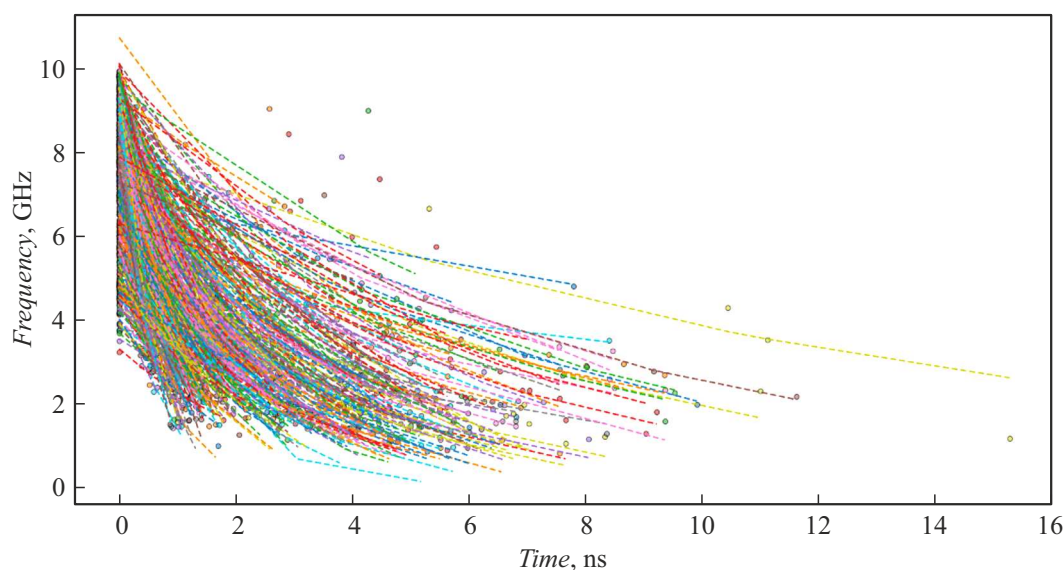


Рис. 3. Аппроксимация кривых сигнала с использованием экспоненциальной функции.

группы пиков (кружки и ромбы). Отмеченные точки соответствуют узлам аппроксимирующих экспоненциальных кривых. В рамках исследования было проанализировано 300 СВЧ-сигналов, полученных в лабораторных условиях. В каждом сигнале анализировались группы всплесков, приходящиеся на интересующую стадию развития атмосферного разряда. Результаты применения аппроксимирующих экспоненциальных функций представлены на рис. 3.

Следующим этапом исследования стал анализ коэффициентов экспоненциальных аппроксимирующих функций, примененных к выявленным кривым в СВЧ-сигнале. Для каждой аппроксимирующей функции были

определены коэффициенты α и β . Полученные значения коэффициентов были отображены на диаграмме распределения (рис. 4, а) с целью анализа распределения параметров и поиска закономерностей в их вариации.

На рис. 4, а представлено распределение коэффициентов аппроксимирующих функций, в котором выявляются два отчетливо различающихся направления, характерных для экспоненциальной аппроксимации. Первая группа (выделена фиолетовым овалом) демонстрирует резкий рост коэффициента β при увеличении параметра α , что может указывать на более интенсивное затухание. Вторая группа (обозначена желтым овалом) характеризуется слабой зависимостью коэффициента β

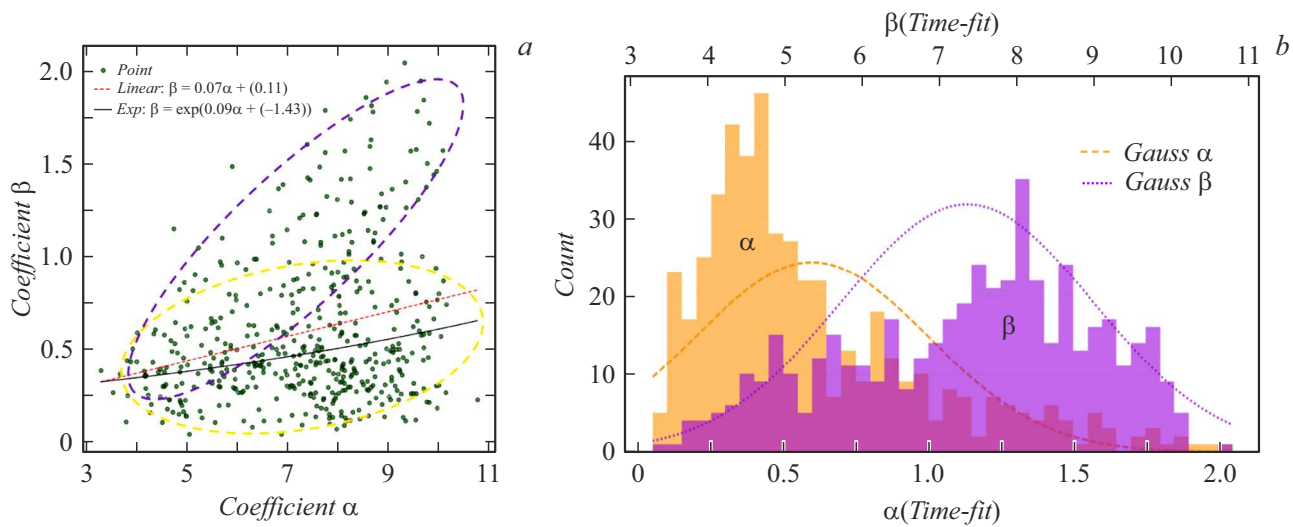


Рис. 4. *a* — диаграмма рассеяния коэффициентов аппроксимирующих экспоненциальных функций. Кривыми представлены линии тренда: пунктирная соответствует линейной линии тренда, сплошная — экспоненциальной. Овалами выделены две группы точек, отражающие различия в темпах затухания: одна с быстрым, другая с медленным спадом амплитуды. *b* — гистограммы коэффициентов аппроксимирующих экспоненциальных функций α и β , кривые на гистограмме соответствуют нормальному распределению. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

от параметра α . Подобное поведение может свидетельствовать о тенденции к стабилизации процессов в данной категории вспыхивающих объектов в диапазоне СВЧ-сигнала.

Анализ распределения коэффициентов аппроксимации позволяет сформулировать следующие гипотезы. Во-первых, наблюдаемые закономерности могут быть следствием наличия двух различных механизмов генерации СВЧ-сигнала, определяющих динамику спектральной ширины пиков в пределах каждой группы. Во-вторых, это может указывать на неоднородную природу вспыхивающих событий: часть из них может генерироваться в результате быстрых локальных процессов, тогда как эволюция других может быть связана с более медленными и глобальными процессами в плазме разряда.

Результаты анализа распределения коэффициентов аппроксимирующих функций представлены на рис. 4, *b* в виде гистограмм. Как показано на рисунке, эмпирические распределения коэффициентов аппроксимации демонстрируют расхождение с нормальным распределением. Наблюдаемое отклонение распределений коэффициентов аппроксимации от нормального закона свидетельствует о сложности и нелинейности процессов, формирующих динамику вспыхивающих структур. Данное наблюдение не позволяет использовать упрощенные статистические модели, основанные на предположении о нормальности, и указывает на необходимость разработки более сложных моделей, учитывающих совокупное воздействие множества факторов, для адекватного описания предпробойной стадии разряда.

Основной целью исследования являлся анализ вспыхивающих структур в СВЧ-сигналах на предпробойной

стадии искрового разряда, характеризующихся кратковременными высокоамплитудными всплесками с четкой локализацией во временной и частотной областях. Для их идентификации применялся вейвлет-анализ, обеспечивший точную частотно-временную локализацию. Динамика всплесков описывалась с помощью экспоненциальной аппроксимации, что позволило количественно оценить начальную амплитуду аппроксимирующей функции, которая характеризует первичную спектральную ширину каждой группы пиков и темп затухания, а также провести их статистический анализ.

Экспоненциальная аппроксимация позволила количественно охарактеризовать каждый всплеск с помощью коэффициентов начальной амплитуды α и темпа экспоненциального затухания β . Анализ распределения этих коэффициентов выявил закономерности в корреляции между α и β при учете временного промежутка.

Данный подход позволил установить, что наблюдаемые вспыхивающие объекты можно разделить на два типа, различающихся как по амплитуде, так и по характеру затухания. Один тип демонстрирует быстрое убывание сигнала при высоких значениях амплитуды аппроксимирующей функции, в то время как другой характеризуется более плавным и устойчивым затуханием, с меньшей зависимостью скорости убывания от амплитуды. Эти различия могут отражать наличие различных физических механизмов формирования всплесков.

Финансирование работы

Работа финансировалась за счет средств Российского научного фонда (грант № 23-19-00524).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Г.А. Месяц, *Импульсная энергетика и электроника* (Наука, М., 2004).
- [2] D. Petersen, M. Bailey, W.H. Beasley, J. Hallet, J. Geophys. Res., **113** (D17) (2008). DOI: 10.1029/2007JD009036
- [3] V. Cooray, G. Cooray, IEEE Access, **117**, 18 (2012). DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.06.004
- [4] F. Shi, N. Liu, J.R. Dwyer, K.M.A. Ihaddadene, Geophys. Res. Lett., **46** (1), 443 (2019). DOI: 10.1029/2018GL080309
- [5] J. Koile, N. Liu, J. Dwyer, Geophys. Res. Lett., **48** (24), e2021GL096214 (2021). DOI: 10.1029/2021GL096214
- [6] M. Hayakawa, D.I. Iudin, V.Y. Trakhtengerts, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., **70** (13), 1660 (2008). DOI: 10.1016/j.jastp.2008.06.011
- [7] A.V. Agafonov, V.A. Bogachenkov, A.P. Chubenko, A.V. Oginov, A.A. Rodionov, A.S. Rusetskiy, V.A. Ryabov, A.L. Shepetov, K.V. Shpakov, J. Phys. D, **50** (16), 165202 (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa5dba
- [8] P. Frick, R. Beck, E.M. Berkhuijsen, I. Patrickeyev, Mon. Not. R. Astron. Soc., **327** (4), 1145 (2001). DOI: 10.1046/j.1365-8711.2001.04812.x
- [9] П.Г. Фрик, Д.Д. Соколов, Р.А. Степанов, УФН, **192** (1), 69 (2022). DOI: 10.3367/UFNr.2020.10.038859 [P.G. Frick, D.D. Sokoloff, R.A. Stepanov, Phys. Usp., **65** (1), 62 (2022). DOI: 10.3367/UFNe.2020.10.038859].
- [10] E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov, I.S. Baidin, K.V. Shpakov, A.A. Rodionov, Ya.K. Bolotov, V.A. Ryabov, Yu.K. Kurilenkov, I.S. Samoylov, S.A. Ambrozevich, A.V. Oginov, Phys. Rev. E, **106** (4), 045210 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevE.106.045210
- [11] И.С. Байдин, *Генерация высокочастотного радиоизлучения в начальной фазе высоковольтного протяженного искрового разряда в воздухе*, канд. дис. (ФИАН, М., 2025).
- [12] Е.В. Паркевич, К.В. Шпаков, А.А. Родионов, И.С. Байдин, Я.К. Болотов, А.В. Огинов, Письма в ЖЭТФ, **120** (2), 111 (2024). DOI: 10.31857/S1234567824140052 [E.V. Parkevich, K.V. Shpakov, A.A. Rodionov, I.S. Baidin, Ya.K. Bolotov, A.V. Oginov, JETP Lett., **120** (2), 109 (2024). DOI: 10.1134/S0021364024601751].