

**Рис. 1.** Скалограмма участка СВЧ-сигнала с выраженным 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  $\omega_0$  — 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 вспышечных структур (пиков), возникающих при столкновении встречно направленных стримеров на предпробойной стадии искрового разряда. Согласно гипотезе, частотно-временные параметры вспышек допускают аппроксимацию экспоненциальной функцией

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

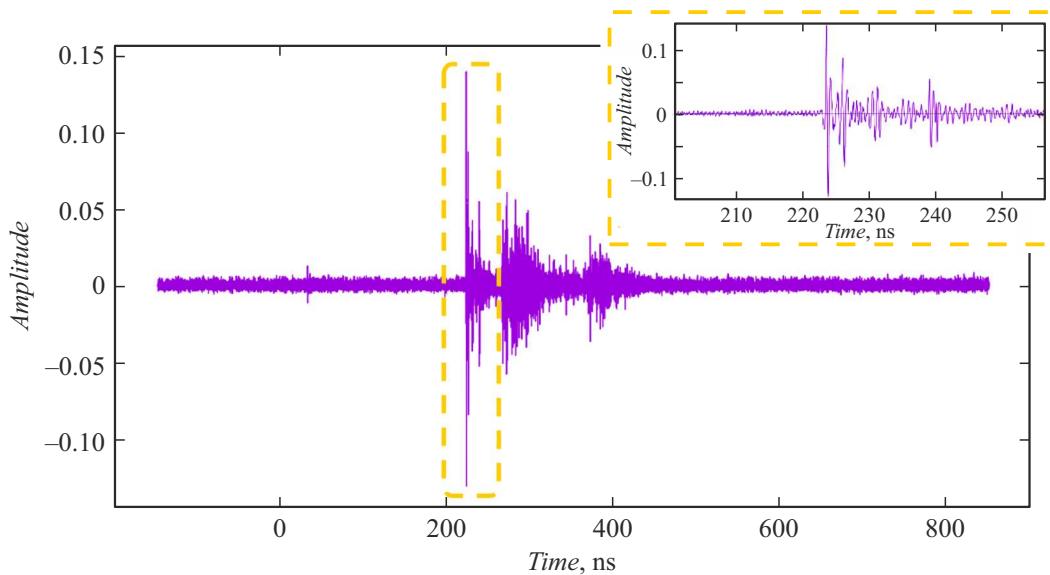
где  $\alpha$  — амплитуда аппроксимирующей функции, которая определяется спектральной шириной первого пика в каждой группе точек на скалограмме,  $\beta$  — коэффициент затухания, характеризующий скорость уменьшения амплитуды во времени.

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

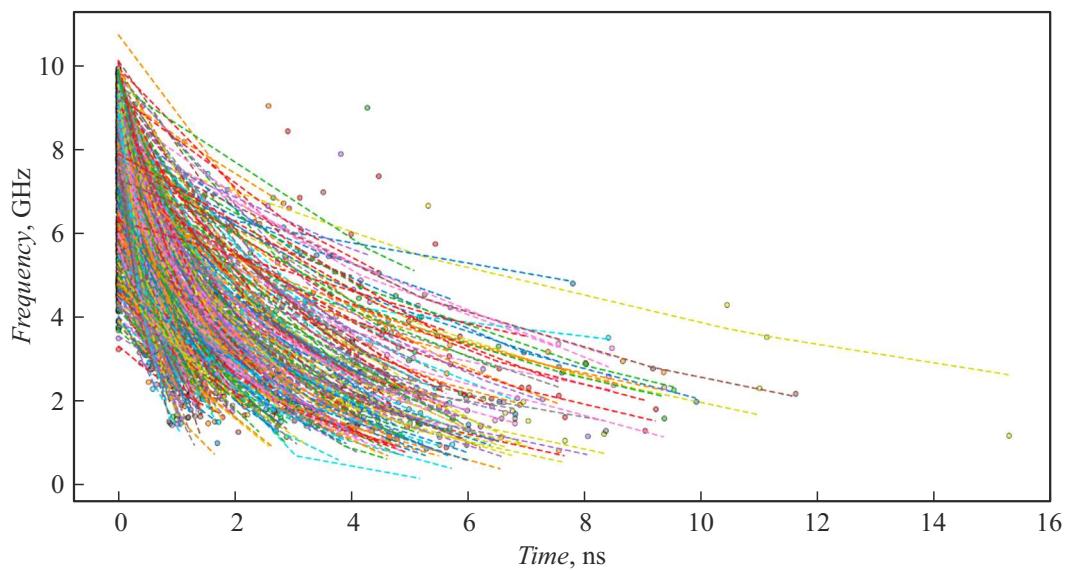
ботающие в сантиметровом диапазоне и обеспечивающие прием в диапазоне выше 1 GHz. Антенны были установлены на расстоянии 3 м от лабораторной искры. Радиосигнал от антенн регистрировался осциллографом LeCroy WM 8620A с полосой пропускания 6 GHz. Передача радиосигнала до регистрирующей аппаратуры осуществляется по коаксиальному кабелю марки SF-141 FEP 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 вспышек 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.



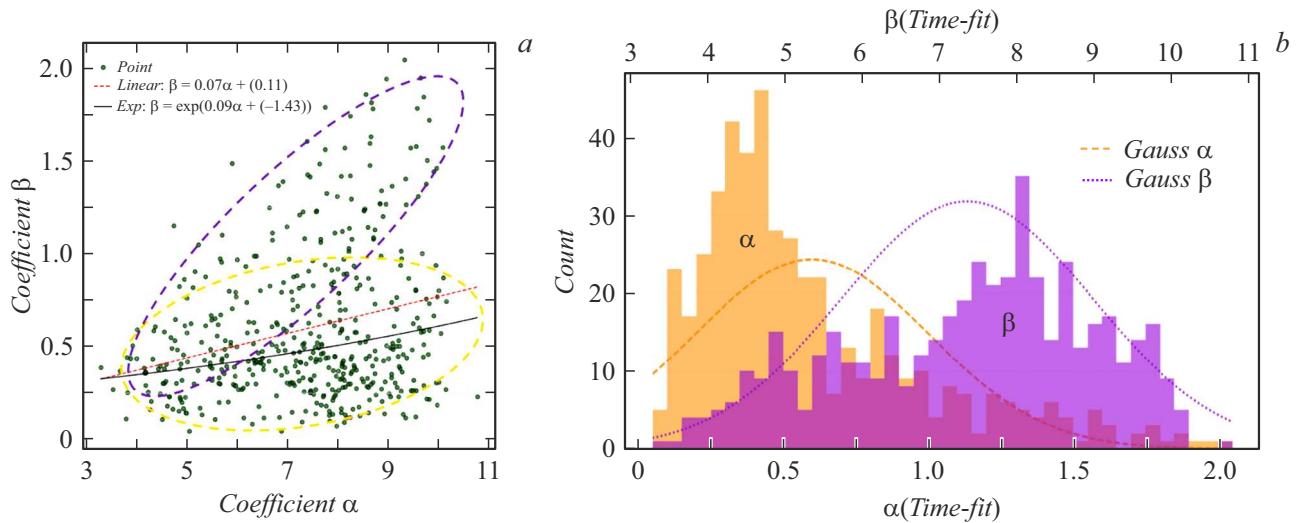
**Рис. 3.** Аппроксимация кривых сигнала с использованием экспоненциальной функции.

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 вспышек, 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

определенны коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ . Полученные значения коэффициентов были отображены на диаграмме распределения (рис. 4, a) с целью анализа распределения параметров и поиска закономерностей в их вариации.

На рис. 4, a 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  $\beta$  при увеличении параметра  $\alpha$ , что может указывать на более интенсивное затухание. Вторая группа (обозначена желтым овалом) характеризуется слабой зависимостью коэффициента  $\beta$



**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  $\alpha$  и  $\beta$ , кривые на гистограмме соответствуют нормальному распределению. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

от параметра  $\alpha$ . Подобное поведение может свидетельствовать о тенденции к стабилизации процессов в данной категории вспышечных 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 вспышечных 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 вспышечных 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 вспышечных 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 вспышек 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  $\alpha$  и темпа экспоненциального затухания  $\beta$ . Анализ распределения этих коэффициентов выявил закономерности в корреляции между  $\alpha$  и  $\beta$  при учете временного промежутка.

Данный подход позволил установить, что наблюдаемые вспышечные 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 вспышек.

## 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: 10.11016/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. Berkhuysen, 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/UFN.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].