

04

## **Фрактальная пространственная структура грозового разряда и ее взаимосвязь со структурами высоковольтных разрядов других типов**

© А.А. Тренькин

Российский Федеральный ядерный центр,  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
экспериментальной физики, Саров  
E-mail: karelin@ntc.vniief.ru

*Поступило в Редакцию 14 сентября 2009 г.*

Определена фрактальная размерность грозового разряда. Показано, что по значению размерности, а также и способу организации пространственной структуры, грозовой разряд стоит в одном ряду с высоковольтными разрядами других типов: стримерной короной, поверхностным, наносекундными диффузным, искровым и бесстримерным. Это позволяет сделать вывод об общности физических механизмов самоорганизации структур высоковольтных разрядов.

Фрактальный характер пространственной структуры проявляют многие типы электрических разрядов. Наглядной ветвящейся структурой обладают грозовые (молниевые) и поверхностные разряды, импульсные стримерные короны, искровые разряды в резко неоднородных промежутках. Вместе с тем в ряде работ обнаружена внутренняя микроструктура внешне сплошных разрядных каналов, имеющая фрактальную организацию. Так, микроструктура обнаружена в высоковольтных наносекундных диффузном разряде в резко неоднородной геометрии [1–3], искровом разряде в однородных и резко неоднородных промежутках [4], бесстримерном разряде в однородном поле [5,6]. Показано, что пространственная структура таких разрядов самоподобна и формируется в стадии перемигания разрядного промежутка за счет ионизационной неустойчивости [5–7]. В данной работе определена фрактальная размерность грозового разряда, зарегистрированного нами высокоскоростной камерой в августе 2008 г., и рассмотрено соотноше-

ние значения полученной размерности с фрактальными размерностями разрядов указанных выше типов.

Исследование пространственной структуры молнии представляет собой сложную задачу в силу скоротечности процесса, вероятностного характера ее возникновения во времени и пространстве, широкого диапазона интенсивности ее свечения [8]. Одним из основных способов исследования структуры молнии является фотосъемка ее свечения, в том числе с разверткой во времени, и последующий анализ фотографий. Следует особо отметить, что любое фотографическое изображение молнии является проекцией ее трехмерной структуры на плоскость, в связи с чем определение фрактальной размерности  $D_f$  молнии по фотографиям не вполне корректно.

В этой связи более употребительным методом определения фрактальной размерности является метод, основанный на подсчете числа каналов  $N$  внутри поверхности радиуса  $z$  и построении зависимости [9–11]

$$\ln(N(z)) = d_f \ln\left(\frac{z}{z_0}\right). \quad (1)$$

Определяя угловой коэффициент данной зависимости  $d_f$ , получаем фрактальную размерность структуры  $D_f = d_f + 1$ . Здесь  $d_f$  есть размерность множества, образованного пересечениями каналов ортогональной к направлению их распространения поверхности; единица характеризует топологическую структуру каналов молнии вдоль направления их распространения, в котором каналы являются линейными связными множествами, обеспечивающими протекание тока.

Вместе с тем необходимо отметить следующие трудности при определении фрактальной размерности по интегральной фотографии молнии, связанные с подсчетом числа каналов. Во-первых, определяемая из (1) величина  $d_f$  представляет в этом случае фрактальную размерность проекции на вертикальную плоскость множества пересечений каналами молнии горизонтальной плоскости (предполагается вертикальное направление распространения молнии). При этом не учтенными оказываются каналы, находящиеся на одной линии съемки. В этой связи определяемый из (1) по фотографии коэффициент будем в дальнейшем обозначать  $d_{f1}$ . Во-вторых, на фотографии видны лишь наиболее крупные интенсивно светящиеся каналы, засвечивающие более мелкие и менее яркие. По той же причине неучтенными будут и каналы, возникающие, но по каким-либо причинам не развивающиеся в



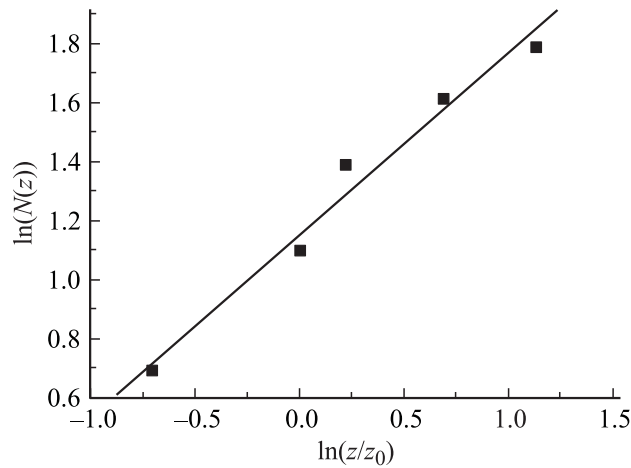
**Рис. 1.** Фотографии свечения молнии (август 2008 г).

дальнейшем. В связи с этим определяемая по интегральной фотографии  $D_f$  является, очевидно, заниженной.

Указанные недостатки частично устранимы при использовании скоростной съемки, когда удастся получить несколько кадров последовательного развития молниевых разрядов. В этом случае предшествующие кадры позволяют учесть в последующих стадиях слабосветящиеся и не развившиеся каналы.

На рис. 1 представлены 2 кадра последовательных стадий свечения молнии, зарегистрированного высокоскоростной камерой TSHRCE при скорости съемки 250 кадров/с. На рис. 2 представлена зависимость (1), построенная для правой ветви молнии (рис. 1).

Определенная по рис. 2 величина  $d_{f1} = 0.62 \pm 0.05$  близка по значению к размерности одномерного классического множества кантора ( $D_{fc1} \approx 0.63$ ). Это позволяет предположить, что, как и в случае искрового и бесструмерного разрядов [5,6], множество пересечений каналов молнии с горизонтальной плоскостью является двумерным канторовым, размерность которого составляет  $D_{fc2} = 2 \cdot D_{fc1}$  [12]. Тогда фрактальная размерность пространственной структуры молнии составит  $D_f = 2 \cdot d_{f1} + 1 = 2 \cdot 0.62 + 1 \approx 2.24$ . Данное значение следует, вероятно, рассматривать как оценку сверху, поскольку в проекции трехмерной структуры грозового разряда (при его фотографировании)



**Рис. 2.** График зависимости (1) для правой ветви молнии.

на плоскость регистрируется, по-видимому, больше каналов, чем корень квадратный из общего их числа. С другой стороны, из общих топологических соображений  $D_f$  не может быть меньше 2, поскольку каждый отдельный канал имеет цилиндрическую форму, а пересечение совокупности каналов молнии с любой ортогональной их распространению поверхностью образует множество, фрактальная размерность которого  $d_f > 1$  и, следовательно,  $D_f > 2$ . Те же рассуждения применимы и к поверхностным разрядам, для которых определенная по фотографиям фрактальная размерность составила  $D_f = 1.7$  — для разряда над поверхностью диэлектрика [10] и  $D_f = 1.85$  — над поверхностью воды [11].

Таким образом, для фрактальной размерности грозового и, по-видимому, поверхностного разряда результаты настоящей работы устанавливают значения  $D_f > 2$ , причем для молнии  $2 < D_f \leq 2.24$ .

По значению фрактальной размерности, а значит и способу организации пространственной структуры, грозовой разряд стоит в одном ряду с такими высоковольтными разрядами, как стримерная корона ( $D_f = 2.16$ ), поверхностный, наносекундный искровой и бесстримерный ( $D_f = 2.19-2.33$ ) [5,6,9-11]. Поскольку в искровом и бесстри-

мерном разрядах фрактальную пространственную структуру образуют микроканалы [4–6], из принципа самоподобия фрактальных структур можно предположить, что составляющие молнию каналы также обладают внутренней микроструктурой. Это позволяет сделать вывод об общности физических механизмов самоорганизации структур высоковольтных разрядов.

Автор выражает благодарность С.В. Воеводину за осуществление съемки молнии, а также В.И. Карелину и В.В. Горохову за полезное обсуждение работы и помощь в подготовке статьи.

## Список литературы

- [1] Буранов С.Н., Горохов В.В. и др. // КЭ. 1991. Т. 18. В. 7. С. 891–893.
- [2] Буранов С.Н., Горохов В.В. и др. // Сб. научных трудов / Под ред. В.Д. Селемира, А.Е. Дубинова, Саров, 1998. С. 39–67.
- [3] Репьев А.Г., Репин П.Б., Покровский В.С. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 1. С. 56–62.
- [4] Перминов А.В., Тренькин А.А. // ЖТФ. 2005. Т. 75. В. 9. С. 52–55.
- [5] Тренькин А.А., Карелин В.И. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 3. С. 29–35.
- [6] Тренькин А.А., Карелин В.И. // Изв. вузов. Физика. 2007. № 9. Приложение. С. 22–25.
- [7] Карелин В.И., Тренькин А.А. // ЖТФ. 2008. Т. 78. В. 9. С. 134–137.
- [8] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
- [9] Попов Н.А. // ФП. 2002. Т. 28. № 7. С. 664–672.
- [10] Niemeyer L., Pietronero L., Wiesmann H.J. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 52. N 12. P. 1033–1036.
- [11] Белошеев В.П. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 4. С. 35–40.
- [12] Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая. Ижевск: НИЦ „Регулярная и хаотическая динамика“, 2001.