

03;04;12

Исследование характеристик искрового разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей

© А.Г. Темников,¹ А.В. Орлов,¹ В.Н. Болотов,² Ю.В. Ткач²¹ Московский энергетический институт (Технический университет),
111250 Москва, Россия

e-mail: temnikov@fee.mpei.ac.ru

² Институт электромагнитных исследований,

61022 Харьков, Украина

e-mail: renic@iemr.com.ua

(Поступило в Редакцию 11 октября 2004 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований оптических и токовых характеристик искровых разрядов между искусственным облаком сильно заряженного водного аэрозоля и заземленным электродом и спектральные характеристики токов разряда, полученные с помощью вейвлетного преобразования и фурье-анализа. Выявлены и проанализированы три основные формы финальной стадии разряда. Их характеристики существенным образом зависят от траектории и глубины проникновения разряда в облако заряженного аэрозоля. Найдено, что самая мощная форма разряда по своим параметрам (светимость канала разряда, скорость нарастания тока в финальной стадии, глубокое проникновение внутрь облака заряженного аэрозоля) близка к главному разряду природной молнии и нейтрализует до 5% облачного заряда. В отличие от фурье-анализа вейвлетный анализ показал максимальную интенсивность сигнала (фактически скорости энерговыделения в канале разряда) на более высоких частотах для всех форм разряда. Особенно выделяется самый мощный разряд, для которого наибольшая интенсивность сигнала (на один-два порядка больше, чем при других видах разряда) наблюдается на частотах несколько сотен мегагерц.

Введение

Исследование проблемы развития разряда в облаках заряженного водного аэрозоля является важным как для более глубокого понимания физики грозы, так и для прогнозирования воздействия молнии на наземные объекты и летательные аппараты [1–3]. Сегодня еще не ясно, как и какие разрядные процессы происходят в пределах различных областей грозы и как вспышки молнии инициируются и распространяются внутри облака и вблизи него. Это связано с тем, что механизмы развития разряда в сильно заряженных аэрозольных образованиях (грозовых ячейках) и нейтрализации заряда грозового облака во время развития нисходящего лидера молнии и на стадии главного разряда наименее исследованы (особенно экспериментально). Экспериментальные возможности [4,5] не позволяли получать и изучать разряды длиной более чем десять сантиметров.

В настоящее время практически не исследованы процессы взаимодействия канальных разрядов, развивающихся в атмосфере, с локальными областями облачного аэрозольного заряда (грозовыми ячейками). В то же время эти процессы являются ключевыми во многих вопросах развития молнии и поражения ею наземных объектов и летательных аппаратов [1,3]. Считается, что у первого компонента восходящей молнии главная стадия отсутствует, а наблюдается только у последующих компонентов, которые стартуют уже от облака и движутся к земле, ничем не отличаясь от компонентов нисходящих молний [1]. Но не после каждой восходящей молнии, проникающей в грозовое облако, следует обратный

разряд [3,6,7], т.е. запуск привычной системы стреловидный лидер—последующий обратный разряд определяется взаимодействием восходящего лидерного разряда и грозовой ячейки. Помимо этого, при развитии различных типов биполярных молний существенную роль играют восходящие разряды и очень важны процессы развития разряда уже внутри облаков и подключения к разрядным процессам различных заряженных участков облака [8].

Другая проблема связана с определением механизма развития главной стадии молний различного типа, которая явно проявляется через акустическое и электромагнитное излучение [1]. Разряды молнии излучают мощные вспышки радиосигналов, называемые „сфериками“. Частотный спектр этих вспышек покрывает широкий диапазон от нескольких Нз до нескольких сотен МГц [3,9]. В этом же диапазоне лежат и спектральные частотные характеристики токов различных стадий разряда молнии [10,11]. При этом отмечаются существенные отличия в ключевых частотных диапазонах для различных видов природной молнии. Для обычной молнии облако—земля типичным является частотный диапазон 3–30 МГц [12], для внутриоблачных молний были зафиксированы частоты на порядок большие [13,14], частотные характеристики разрядов с вершины облака к ионосфере существенно зависели от формы разряда [15,16]. Причем большинство спектральных частотных характеристик природной молнии были получены для электромагнитного излучения разряда молнии. Спектральных характеристик тока различных стадий и типов молнии зафиксировано существенно меньше.

В основном есть данные только для обратного разряда и для триггерных молний. Это связано с практической возможностью определения токовых характеристик молнии, особенно для внутриоблачных частей разряда.

Оценка токовых характеристик разряда молнии особенно важна при взаимодействии летательного аппарата с грозовым облаком, когда подлетающий к облаку летательный аппарат инициирует возникновение бинаправленного лидера [17]. Характеристики этого лидера и последующее воздействие молнии на летательный аппарат существенным образом определяются взаимодействием одного из лидеров с объемным аэрозольным зарядом грозовой ячейки, которая его инициирует [18].

Использование искусственных сильно заряженных аэрозольных образований, способных инициировать канальные разряды, дает возможность получить токовые характеристики разрядов, распространяющихся как внутри облака заряженного аэрозоля, так и в промежутке между облаком и землей.

В данной статье представляются и анализируются результаты экспериментальных исследований формирования разряда между искусственным отрицательно заряженным облаком водного аэрозоля и стержнем на заземленной плоскости под облаком. Параметры облака позволяют получать и исследовать весь спектр разрядных явлений, которые могут происходить в естественной грозовой ситуации вплоть до лидерной и главной стадии [19]. Главное внимание уделяется изучению процессов развития разряда в самом облаке заряженного водного аэрозоля. На основе проведенных экспериментальных исследований развития разряда между искусственным облаком сильно заряженного водного аэрозоля и заземленным электродом исследуются амплитудно-временные и спектральные характеристики тока разряда в облаке заряженного водного аэрозоля на различных стадиях его развития.

1. Экспериментальное исследование оптических и токовых характеристик разряда между облаком заряженного водного аэрозоля и землей

Экспериментальный исследовательский комплекс состоит из аэрозольной камеры объемом около 250 m^3 , генератора заряженного аэрозоля (ГЗА), исследуемой электродной системы и измерительного комплекса. Схема экспериментального исследовательского комплекса показана на рис. 1. Генератор заряженного аэрозоля конденсационного типа используется для создания облака заряженного водного аэрозоля над заземленной плоскостью. В генераторе использовано дозвуковое суживающееся сопло с диаметром концевой сечення 6 мм. Сопловое устройство установлено в электростатическом экране и находится на высоте 0.8 м над заземленной плоскостью. Угол наклона оси заряженной аэрозольной

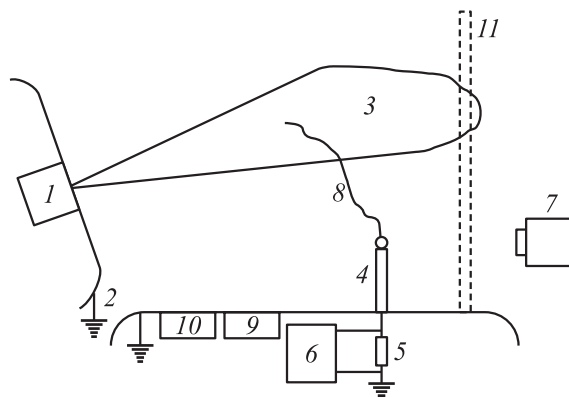


Рис. 1. Схема экспериментального исследовательского комплекса: 1 — генератор заряженного аэрозоля конденсационного типа, 2 — заземленные электростатические экраны, 3 — облако заряженного аэрозоля, 4 — стержневой электрод со сферической вершиной, 5 — мало индуктивный шунт, 6 — цифровые запоминающие осциллографы Tektronix TDS 754D и TDS 3052, 7 — цифровая фотокамера Canon PowerShot G1, 8 — искровой разряд, 9 — датчик напряженности электрического поля, 10 — динамическая антенна, 11 — крупно сетчатый заземленный экран.

струи по отношению к горизонтальной заземленной плоскости может варьироваться в диапазоне от 0 до 30° , а в данных экспериментах был равен 12° . Длина струи заряженного аэрозоля могла регулироваться крупно сетчатым электростатическим экраном, устанавливаемым поперек газодинамического потока. При рабочих давлениях в парогенераторе 3–8 atm скорость истечения пара составляет 400–430 м/с.

Аэрозольное облако имеет объем несколько кубических метров. Зарядное устройство ГЗА обеспечивает ток выноса до $150 \mu\text{A}$. Объемная плотность заряда на оси облака находится в диапазоне $1.5 \cdot 10^{-4} - 1.0 \cdot 10^{-2} \text{ C/m}^3$. Потенциал облака достигает величины 1.5 MV. В результате между заряженным аэрозольным облаком и заземленной плоскостью создается сильное электрическое поле, напряженность которого достигает величины 12 kV/cm вблизи заземленной плоскости и 22 kV/cm на границе облака заряженного аэрозоля. При рабочем режиме экспериментальной установки (ток выноса ГЗА $130 \mu\text{A}$, давление пара в парогенераторе 5–6 atm) область максимального потенциала $\sim 1.4 \text{ MV}$ находится на расстоянии 1.6–1.8 м от соплового устройства на высоте примерно 1 м над горизонтальным заземленным экраном. На границе заряженного аэрозольного потока потенциал может достигать величины 1.0 MV в поперечном сечении, которое находится на расстоянии 1.4–1.5 м от места истечения струи. Подробно характеристики экспериментального комплекса и создаваемых им заряженных аэрозольных облаков представлены в [20,21].

В области между нижней границей создаваемого заряженного аэрозольного облака и заземленной плоскостью на высотах до 0.4 м над горизонтальной заземленной

плоскостью на расстоянии от 1.0 до 2.0 м от соплового устройства электрическое поле имеет практически квазиоднородный характер. Его величина меняется с высотой сравнительно медленно (растет с высотой не более чем на 30–40%, от $\sim 10 \text{ kV/cm}$ у самой плоскости до 13–14 kV/cm на высоте 0.4 м над ней). Таким образом, расположенные в этой области стержневые или другие электроды высотой до 0.4 м будут находиться в близких условиях с точки зрения воздействия на них электрического поля облака заряженного аэрозоля.

Для контролируемого инициирования разряда на плоскости устанавливался стержень со сферической вершиной. Сфера была изолирована от стержня и заземлена через малоиндуктивный шунт. Высота стержневого электрода варьировалась от 100 до 580 мм, радиус кривизны его вершины мог изменяться от 0.5 до 25 мм. Стержень устанавливался на расстояниях 1.3–1.8 м от соплового устройства, где напряженность внешнего электрического поля, создаваемого облаком заряженного аэрозоля, была максимальной. При этом само электрическое поле в месте нахождения вершины стержневого электрода было фактически квазиоднородным.

Ток разряда протекал через стержневой электрод и измерялся на малоиндуктивном шунте цифровыми осциллографами Tektronix TDS 754D и TDS 3052 (рис. 1). Напряженность электрического поля и заряд аэрозольного облака контролировались струнным датчиком, установленным в заземленной плоскости. Изменение заряда аэрозольного облака вследствие возникновения разрядных явлений отслеживается динамической антенной, сигнал с которой подается на запоминающий осциллограф Tektronix TDS 754D. Синхронно с осциллограммой тока цифровой фотокамерой Canon PowerShot G1 фиксировались оптическая картина проникновения и распространения разряда.

Были найдены три характерные формы искрового разряда между заряженным облаком и заземленным электродом, когда сформировавшийся разряд проникал в облако заряженного водного аэрозоля. Первая и третья формы существенно отличались и своими оптическими характеристиками, и параметрами импульса тока на финальной стадии, когда происходила нейтрализация части облачного аэрозольного объемного заряда. Помимо них был выделен и незавершенный разряд (НЗР), который не достигал границ облака и характеризовался слабым свечением и небольшими токами в завершающей фазе разряда. Оптические и токовые характеристики различных форм разряда (длина канала искры L ; число крупных секций N ; количество явных пиков на осциллограмме тока M ; максимальная амплитуда тока I_{\max} ; длительность финальной стадии T_f ; длительность фронта импульса тока τ_f на уровне $0.3-0.9I_{\max}$; крутизна импульса тока a на уровне $0.3-0.9I_{\max}$; заряд $Q_{\text{n.f.}}$, нейтрализованный во время финальной стадии; заряд аэрозольного облака $Q_{\text{n.cl.}}$, нейтрализованный искровым разрядом), полученные обработкой нескольких сотен опытов, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры различных форм разряда между заряженным аэрозольным облаком и заземленным электродом

| Характеристики | Форма I | Форма II | Форма III | НЗР |
|---------------------------------|-----------|-----------|----------------|-------------|
| $L, \text{ м}$ | До 2.0 | 1.0–1.7 | 1.0–1.3 | 0.4–0.7 |
| N | 2–4 | 1–2 | 1 | 1–2 |
| M | 2–4 | 1–3 | 1–2 | 1–2 |
| $I_{\max}, \text{ А}$ | До 8 | До 20 | Более 20 | Менее 4 |
| $T_f, \mu\text{с}$ | 2–5 | 0.7–1.9 | 0.3–1.1 | 1–4 |
| $\tau_f, \text{ нс}$ | 50–70 | 30–50 | 5–30 | 100–180 |
| (по всем пикам) | | | | |
| $a, \text{ кА}/\mu\text{с}$ | 0.03–0.09 | 0.13–0.19 | 0.4–2.8 | ~ 0.02 |
| $Q_{\text{n.f.}}, \mu\text{С}$ | 4.5–6.0 | 4.0–5.1 | 5.0–6.5 | 2.0–3.0 |
| $Q_{\text{n.cl.}}, \mu\text{С}$ | ~ 2 | ~ 1 | $\sim 2.5-3.0$ | ~ 0 |

Первая форма искрового разряда (форма I) характеризуется искрами длиной до 2 м, которые имеют относительно слабую яркость даже в течение финальной стадии и состоят из нескольких частей. Характерной особенностью разрядов с формой I является наличие явно выраженной перемычки на высоте 30–50 см над заземленным электродом, которая перпендикулярна участкам разряда, которые она соединяет. Размер перемычки составляет 5–15 см. Разряд формы I показан на рис. 2. Другим существенным признаком разряда формы I является его развитие только вдоль периферийных частей облака заряженного аэрозоля. При этом разряд может обходить области с повышенной плотностью объемного заряда по двум направлениям: по длинному пути вдоль облака по направлению к сопловому экрану и по более короткой траектории в поперечном сечении струи вокруг области с максимальным потенциалом. Разряды формы I никогда не проникали глубоко внутрь облака, а продвигались вдоль периферийных частей аэрозольного облака, имеющих малую плотность объемного аэрозольного заряда и существенную напряженность электрического поля.



Рис. 2. Финальная стадия I формы разряда.



Рис. 3. Финальная стадия III формы разряда.

Осциллограммы тока первой формы разряда имеют явную многопиковую структуру (2 пика и более) и амплитуду до 8 А. Длительность финальной стадии находится в диапазоне $2-5 \mu\text{s}$, минимальная длительность фронта импульса тока — в диапазоне $50-70 \text{ ns}$. В общем этой формой финальной стадии разряда нейтрализуются заряды $4.5-6.0 \mu\text{C}$. При этом заряд, нейтрализованный собственно в заряженном аэрозольном облаке, составляет $30-40\%$ ($\sim 2 \mu\text{C}$). Это связано с тем, что разряды проходят достаточно большой путь в облаке, хотя и по его периферии.

Форма III финальной стадии разряда объединяет очень яркие искры, которые состоят только из одной части длиной порядка $1.0-1.3 \text{ m}$. Разряд с этой формой финальной стадии показан на рис. 3. Особенностью этих мощных разрядов с формой III финальной стадии состоит в следующем: они входят в облако заряженного аэрозоля под углом $40-60^\circ$ к его границам и проходят в глубь облака на расстояние более $20-30 \text{ cm}$.

Осциллограммы тока финальной стадии разряда имеют однопиковую структуру и амплитуду более 20 А. Длительность финальной стадии разряда находится в диапазоне $0.3-1.1 \mu\text{s}$. Минимальная продолжительность фронта соответствующего импульса тока составляет $5-30 \text{ ns}$. Причем для этой формы разряда характерна большая крутизна импульса тока в финальной стадии (до $\sim 3 \text{ kA}/\mu\text{s}$), что более чем на порядок больше, чем при других формах разряда. В общем на финальной стадии при этой форме разряда нейтрализуются заряды $5.0-6.5 \mu\text{C}$. А нейтрализация заряда в облаке составляет $\sim 2.5-3.0 \mu\text{C}$. Такая динамика развития разряда вблизи границ облака заряженного аэрозоля и внутри его является „оптимальной“ с точки зрения максимальной разрядки облака заряженного водного аэрозоля.

Оптические и токовые характеристики II формы финальной стадии разряда находятся между величинами, характеризующими I и III формы разряда. Нейтрализация заряда этой формой разряда в аэрозольном облаке

составляет только $\sim 1 \mu\text{C}$. Это связано с тем, что их траектория внутри облака направлена в сторону области с максимальным потенциалом, вдоль которой напряженность поля падает, а плотность объемного заряда аэрозольных частиц нарастает. В результате развитие разряда в облаке проходит в быстро „слабеющем“ режиме. В этом случае разряды проникают в облако практически перпендикулярно к его границам, проходят не более $5-10 \text{ cm}$ в нем и останавливаются.

2. Спектральные характеристики разрядных токов

Для определения спектральных характеристик разрядного тока и его динамики в процессе развития разрядов в реальном масштабе времени нами используются фурье-анализ и вейвлетный анализ.

Вейвлетный анализ с успехом применяется при исследовании сложных нестационарных сигналов. При применении преобразования Фурье можно получить спектр всего сигнала или нескольких выбранных отрезков этого сигнала в заданный момент. Поэтому преобразование Фурье хорошо подходит только для стационарных сигналов.

Для того чтобы проследить эволюцию нестационарного сигнала и получить частотно-временное представление сигнала, которое позволяет увидеть изменение спектра сигнала во времени, наряду с оконным преобразованием Фурье в работе используется вейвлетное преобразование, обладающее рядом важных преимуществ. Вейвлетное преобразование позволяет исследовать внутреннюю структуру существенно неоднородного объекта, например многомасштабного или нестационарного временного процесса, и изучить его локальные свойства. Такой подход особенно хорош, когда исследуются быстроизменяющиеся сигналы, которые имеют и высокочастотные и низкочастотные компоненты. Эти возможности вейвлетного анализа с успехом применяются для обработки хаотических сигналов [22].

Следует отметить, что существует много различных видов вейвлетов и можно выбирать подходящий вейвлет в соответствии с особенностями решаемой задачи. Поэтому вместе с вейвлетным спектром сигнала всегда указывают, с использованием какого вейвлета он получен. Чаще всего используются следующие вейвлеты: а) DOG-вейвлеты (производные от функции Гаусса), б) COS-вейвлет и SIN-вейвлет Морле, в) комплексный вейвлет Морле, г) вейвлеты Бэттл–Лемарье.

В последние годы вейвлетный анализ находит применение при исследованиях газового разряда и атмосферного электричества. При исследовании гроз вейвлетный анализ, например, использовался для обработки сигналов, характеризующих изменение давления и температуры воздуха и ветра в грозовом облаке при грозе, связывая затем коэффициенты вейвлетного преобразования с интенсивностью грозовой деятельности [23].

Аналогичный подход для выявления тонкой структуры формирующихся облаков применялся в [24,25].

Все чаще вейвлетный анализ применяется при изучении электромагнитных полей при разрядах молнии [26,27]. Полученный развернутый во времени амплитудно-частотный спектр пытаются привязать к различным стадиям развития молнии: к импульсам предварительного пробоя, обратному удару и продолжительному току молнии. При этом часто используется вейвлет Хаара [28], который хорошо анализирует сигналы дискретной формы и применяется для изучения частичных разрядов в изоляционных конструкциях [29].

В данной работе для построения вейвлетных спектров разрядных токов между облаком заряженного аэрозоля и землей применяются специально разработанные программы, использующие комплексный вейвлет Морле, определяемый по формуле

$$\psi(t) = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\pi}}} e^{i\frac{2\pi}{T}t} e^{-\frac{t^2}{2}}.$$

Вейвлет Морле имеет дополнительный параметр T — период осцилляций, определяющий максимальное значение частоты, которую он может обнаружить.

Применяемое вейвлетное преобразование можно представить как непрерывный набор оконных преобразований Фурье с окнами различной ширины, меняющейся с изменением частоты, что позволяет получить оптимальную частотно-временную локализацию для всех исследуемых временных масштабов. Это свойство является ключевым преимуществом вейвлетного преобразования при анализе многомасштабных сигналов, а также сигналов, имеющих особенности в виде скачков амплитуды или фазы, или сигналов, содержащих несколько нестационарных составляющих с разными несущими частотами (сигналы с несколькими модами). Поэтому данное вейвлетное преобразование может с успехом применяться для анализа параметров разрядных токов в облаке заряженного аэрозоля.

На рис. 4 и 5 приведены примеры осциллограмм разрядных токов и соответствующие им вейвлетные спектры I и III форм финальной стадии разряда. Эти вейвлетные спектры соответствуют разряду, показанному на рис. 2 и 3. На рис. 6 приведен соответствующий фурье-спектр III формы разряда.

Вейвлетный анализ осциллограмм тока различных форм разряда выявил характерные частоты и их интенсивность для каждой формы разряда. Было найдено семь характерных частотных диапазонов: < 1, 2–5, 6–10, 11–18, 19–30, 31–50, 51–150, 151–300 МГц. Сами диапазоны и их интенсивность (фактически это характеристики скорости энерговыделения в канале разрядов) существенно отличались как для самих разных форм финальной стадии разряда, так и для первого, и последующих импульсов в каждой форме. Характеристики обработки вейвлетных спектров осциллограмм тока финальной стадии разряда, его незавершенной формы

и предшествующего им лидерного разряда приведены в табл. 2.

Для I формы финальной стадии разряда среди полученных при вейвлетном анализе характерных частотных диапазонов выделяются три диапазона: < 1, 2–5, 6–10 МГц. Эти диапазоны присутствуют в течение всей финальной стадии, причем наибольшая интенсивность сигнала среди них на первой характерной частоте.

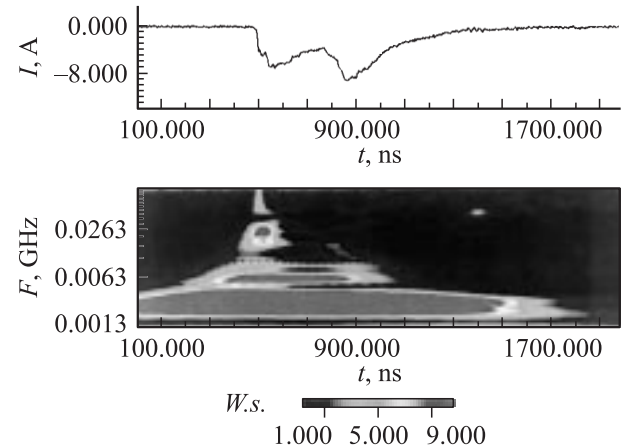


Рис. 4. Вейвлетный спектр I формы разряда.

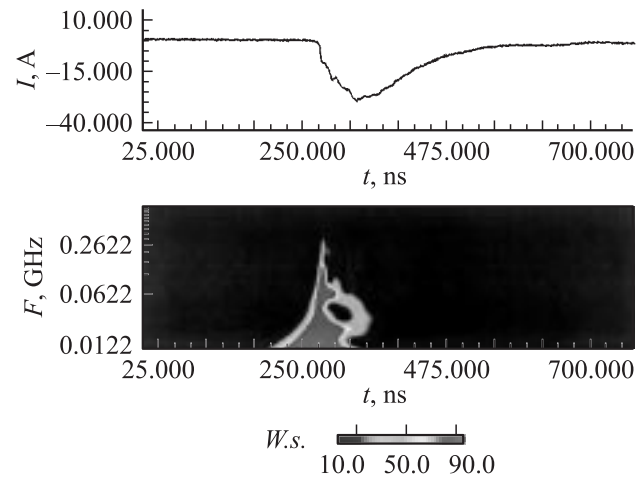


Рис. 5. Вейвлетный спектр III формы разряда.

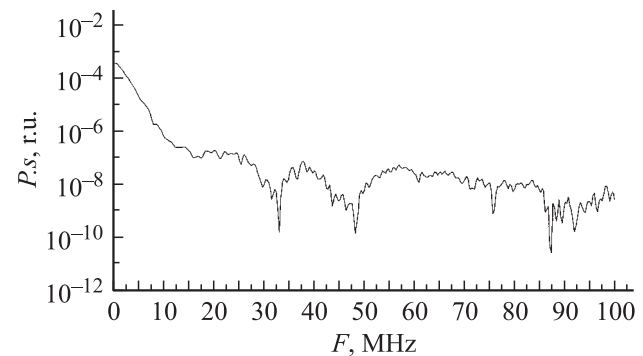


Рис. 6. Фурье-спектр III формы разряда.

Таблица 2. Результаты вейвлетного анализа для разных форм разряда

| Характерные частоты, МГц | < 1 | 2–5 | 6–10 | 11–18 | 19–30 | 31–50 | 51–150 | 151–300 |
|--------------------------|-----|-----|------|-------|-------|-------|--------|---------|
| I форма разряда | + | + | + | + | + | — | — | — |
| II форма разряда | + | + | + | + | + | + | — | — |
| III форма разряда | + | + | + | + | + | + | + | + |
| Незавершенный разряд | + | + | — | — | — | — | — | — |
| Лидерный разряд | — | — | — | + | + | + | + | + |

Необходимо отметить наличие более слабого, но явно выраженного сигнала на фронте первого импульса финальной стадии разряда и в частотных диапазонах 11–18 и 19–30 МГц.

Для незавершенного, со слабо выраженной финальной стадией разряда в осциллограмме тока наблюдаются только два первых частотных диапазона < 1, 2–5 МГц, а интенсивность сигнала в 3–5 раз меньше, чем даже у первой формы разряда.

Вейвлетный анализ осциллограмм тока показал, что для II формы разряда частотный диапазон шире, а интенсивность сигнала выше, особенно на нехарактерных для первой формы диапазонах частот 11–18, 19–30 и 31–50 МГц. Причем последние частоты проявляются только во время первого импульса тока финальной стадии разряда.

Согласно вейвлетному анализу, III форма финальной стадии разряда резко выделяется среди остальных как широким частотным диапазоном, так и большей интенсивностью сигнала на каждой частоте. В ней появляются существенный сигнал в частотных диапазонах 51–150 и 151–300 МГц, которые характерны и для лидерной стадии. Но интенсивность сигналов III формы финальной стадии разряда на этих частотах в несколько сотен раз больше, чем у лидера. В естественных условиях такой же интенсивный сигнал на частотах в несколько сотен мегагерц наблюдался для компактных, но очень мощных внутриоблачных разрядов [14]. Там появление такого интенсивного излучения связали с развитием мощных стримерных разрядов внутри облаков.

Была установлена практически прямо пропорциональная связь между максимальной крутизной импульса тока финальной стадии разряда a каждой формы и максимальной характерной частотой F_{\max} , проявляющейся в вейвлетном спектре осциллограммы тока (рис. 7): чем быстрее нарастал ток на финальной стадии разряда, тем более высокие частоты проявлялись в его спектре. Необходимо отметить, что приведенная зависимость характерна в первую очередь для первых импульсов тока финальной стадии разряда, которые обычно имеют наибольшую крутизну тока в каждой форме разряда. Причем чем выше была характерная частота вейвлетного спектра, тем больше была ее интенсивность. Этот результат показывает существенное отличие результатов обработки экспериментальных кривых с помощью вейвлетного преобразования от фурье-анализа

разрядов молнии, например, при котором интенсивность (амплитуда) сигнала с ростом номинала характерных частот обычно резко уменьшалась [30]. Даже в случае очень мощных разрядов молнии фурье-анализ показывал уменьшение интенсивности сигнала с ростом характерной частоты [31]. Такую же тенденцию подтвердил и фурье-анализ токовых характеристик разрядов в искусственных сильно заряженных аэрозольных облаках.

Фурье-анализ осциллограмм тока различных форм разряда также выявил существенное различие в частотных спектрах. При обработке осциллограмм тока было найдено, что чем мощнее становилась финальная стадия разряда, тем больше возрастал интервал между последовательными характерными частотами в полученном для каждой формы разряда спектре. Полученные характеристики приведены в табл. 3.

Помимо интервала между характерными частотами существенно отличались для каждой формы разряда и сами частотные диапазоны, где эти значимые характерные частоты проявлялись в спектре. Если для незавершенного разряда их верхний потолок не превышал 5 МГц, то при самой мощной III форме финальной стадии разряда характерные частоты проявлялись и на интервале более 150 МГц.

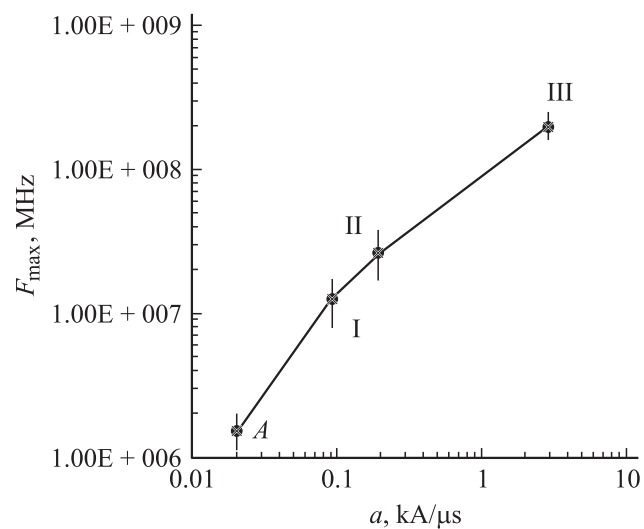
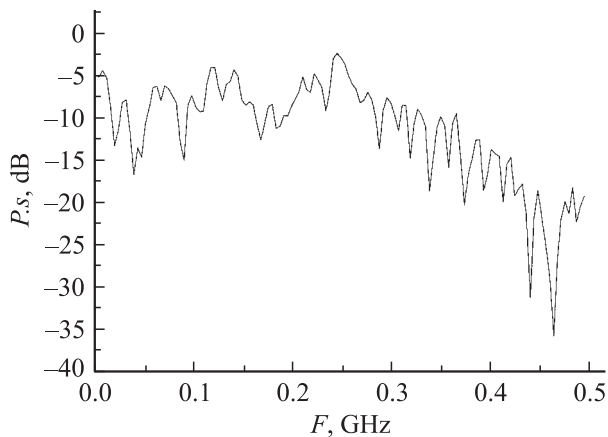


Рис. 7. Зависимость максимальных характеристик частот вейвлетного преобразования осциллограмм тока различных форм разряда от крутизны импульса тока. А — незавершенный разряд, I–III — формы разряда.

Таблица 3. Результаты фурье-анализа для разных форм разряда

| Форма разряда | НЗР | I форма | II форма | III форма |
|---|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Диапазон характерных частот, MHz | До 3–5 | До 15–25 | До 25–50 | До 150–200 |
| Интервал между характерными частотами из фурье-спектра, MHz | 0.4–0.6 | 0.8–2.5 | 1.8–4.0 | 5.0–20.0 |
| Интенсивность сигнала на частоте 5 MHz | 10^{-9} | $7 \cdot 10^{-8}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ | $4 \cdot 10^{-5}$ |

Хорошо известно, что электрические разряды сопровождаются излучением электромагнитных волн. При этом лидерный канал и канал главного разряда представляют собой хорошо проводящую плазму. Этот плазменный канал, с нашей точки зрения, и играет роль антенны. Таким образом, зная изменение тока разряда со временем, можно определить спектр электромагнитных волн, излучаемых на протяжении разрядного процесса. Интенсивность этого электромагнитного излучения в дипольном приближении пропорциональна квадрату фурье-образа производной временной реализации разрядного тока, т.е. фактически определяется крутизна тока. Исходя из свойств преобразований Фурье, можно также сказать, что интенсивность этого излучения пропорциональна квадрату фурье-образа разрядного тока, умноженного на квадрат частоты. На рис. 8 приведен фурье-спектр электромагнитного излучения, генерируемый III формой разряда. Таким образом, приведенные в статье частотные характеристики разрядных токов дают нам информацию о спектрах электромагнитных волн, излучаемых в процессе разряда.

**Рис. 8.** Спектр электромагнитного излучения, генерируемый III формой разряда.

Выводы

Экспериментальные исследования развития разряда в промежутке облако заряженного аэрозоля—стержень на заземленной плоскости выявили три различных формы разряда. Их характеристики и заряд, нейтрализуемый в аэрозольном облаке, существенно зависят от траектории развития предшествующего лидерного разряда по отношению к формирующемуся заряженному аэрозольному облаку, места и направления входа разряда в облако заряженного аэрозоля и возможности появления встречного разряда их облака заряженного аэрозоля.

Существенно выделяются среди зафиксированных форм разряда между облаком заряженного аэрозоля и заземленным электродом под ним по своим параметрам разряды с третьей формой финальной стадии, которые по ряду характеристик (высокая светимость канала разряда, крутизна импульса тока в финальной стадии превышает $\sim 1 \text{ kA}/\mu\text{s}$, глубокое проникновение внутрь заряженного аэрозольного облака) близки к главному разряду природной молнии. Особенность мощных разрядов с третьей формой финальной стадии, при которых нейтрализуется наибольший заряд облака, состоит в следующем: они входят в облако заряженного аэрозоля под углом $40\text{--}60^\circ$ к его границам и проходят в глубь облака на расстояние более $20\text{--}30 \text{ см}$. При этом может быть нейтрализовано до $3 \mu\text{C}$ объемного аэрозольного заряда облака.

Спектральные характеристики токов разряда между облаком заряженного водного аэрозоля и заземленным электродом, полученные с помощью вейвлетного преобразования и фурье-анализа, показали для разных форм разряда близкие характерные частотные диапазоны, но существенно отличные интенсивности сигнала на характерных частотах. Вейвлетный анализ показал, что интенсивность сигнала (фактически энерговыделения при развитии разряда) максимальна как раз на более высоких частотах. Причем чем мощнее разряд (по оптическим и токовым характеристикам), тем более характерный частотный диапазон и выше интенсивность сигнала и в фурье-, и в вейвлетном спектрах.

Особенно выделяется среди зафиксированных форм разряда в облаке заряженного аэрозоля самая мощная третья форма, для которой наибольшая интенсивность сигнала (на один—два порядка выше, чем при других видах разряда) наблюдается на характерных частотах несколько сотен мегагерц. Интенсивное излучение на таких частотах характерно для длинных стримерных разрядов, особенно для отрицательных стримеров [14,32]. Возможной причиной появления интенсивного сигнала на таких сверхвысоких частотах в мощных разрядах, проникающих внутрь облака заряженного аэрозоля, может быть возникновение в пограничной области облака отрицательной стримерной короны, развивающейся навстречу подходящему к границам облака, восходящему положительному лидеру.

Список литературы

- [1] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
- [2] *Williams E.R., Cooke C.M., Wright K.A.* // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90. N D4. P. 6059–6070.
- [3] *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003.
- [4] *Barreto E.J.* // Geophys. Res. 1969. Vol. 74. N 28. P. 6911–6926.
- [5] *Sugimoto T., Tanaka S., Higashiyama Y., Asano K.* // IEEE Trans. on Industry Applications. 1999. Vol. 35. N 1. P. 225–230.
- [6] *Wada A., Asakawa A., Shindo T.* // Proc. 26th Intern. Conf. on Lightning Protection. Crakow, 2002. Vol. 1. P. 3–7.
- [7] *Miki M., Shindo T., Rakov V.A.* et al. // Ibid. P. 14–19.
- [8] *Rakov V.A.* // Bulletin of American Meteorological Society (BAMS). 2003. N 6. P. 767–776.
- [9] *Thomas R.J., Krehbiel P.R., Rison W.* et al. // Geophys. Res. Lett. 2001. Vol. 28. N 1. P. 143–146.
- [10] *Rakov V.A., Uman M.A.* // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 1996. Vol. 38. N 2. P. 156–164.
- [11] *Rakov V.A.* // IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility. 2001. Vol. 43. N 4. P. 654–661.
- [12] *Shao X.M., Krehbiel P.R., Thomas R.J.* et al. // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. P. 2749–2783.
- [13] *Le Vine D.M.* // J. Geophys. Res. 1980. Vol. 85. P. 4091–4095.
- [14] *Smith D.A., Shao X.M., Holden D.N.* et al. // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 4189–4212.
- [15] *Lyons W.A., Nelson T.E., Armstrong R.A.* et al. // Bulletin of American Meteorological Society (BAMS). 2003. N 4. P. 445–454.
- [16] *Rodger C.J., Wait J.R., Dowden R.L.* et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1998. Vol. 60. P. 1193–1204.
- [17] *Uman M.A., Rakov V.A.* // Progress in Aerospace Sciences. 2003. Vol. 39. P. 61–81.
- [18] *Mazur V.J.* // Geophys. Res. 1989. Vol. 94. P. 3311–3325.
- [19] *Темников А.Г., Орлов А.В.* // Proc. 26th Intern. Conf. on Lightning Protection. Cracow, 2002. Vol. 1. P. 298–301.
- [20] *Темников А.Г., Орлов А.В.* // Электричество. 1996. № 8. С. 18–25.
- [21] *Темников А.Г., Фирсов К.Н., Василяк Л.М.* и др. // ТВТ. 2003. Т. 41. № 2. С. 200–210.
- [22] *Болотов В.Н., Колесников С.Е., Ткач Ю.В.* // Электромагнитные явления. 2001. Т. 2. № 3 (7). С. 335–379.
- [23] *Takeuchi N., Narita K.I., Goto Y.* // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. N D5. P. 10751–10757.
- [24] *Yano J.-I., Moncrieff M.W., Wu X., Yamada M.* // J. Atmos. Sci. 2001. Vol. 58. N 8. P. 850–867.
- [25] *Yano J.-I., Moncrieff M.W., Wu X.* // J. Atmos. Sci. 2001. Vol. 58. N 8. P. 868–878.
- [26] *Wada M., Ushio T., Kawada M.* et al. // Trans. Inst. Electr. Eng. Jap. B. 1996. Vol. 116-B. N 4. P. 469–474.
- [27] *Виноградов В.В., Литвиненко Г.В.* // Proc. of Intern. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. New Zealand, 1998.
- [28] *Ageyev A., Gandelli A., Zich R.* // Proc. 15th Intern. Zurich Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility. Zurich, 2003.
- [29] *Tungkanawanich A., Hamid E.Y., Kawasaki Z.-I., Matsuura K.* // IEEE Power Engineering Society Meeting. 2001.
- [30] *Lanzerotti L.J., Thomson D.J., MacIennon C.G.* et al. // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94. P. 13221–13227.
- [31] *Wilett J.C., Bailey J.C., Krider E.P.* // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94. P. 16255–16267.
- [32] *Rhodes C.T., Shao X.M., Krehbiel P.R.* et al. // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. P. 13059–13082.