

03;04;12

Влияние модельных гидрометеоров на характеристики финальной стадии разряда из искусственного облака заряженного водного аэрозоля

© А.Г. Темников, А.В. Орлов, Л.Л. Черненский, В.Н. Болотов, В.П. Писарев

Московский энергетический институт (Технический университет),
111250 Москва, Россия
e-mail: temnikov@fee.mpei.ac.ru

(Поступило в Редакцию 23 апреля 2008 г. В окончательной редакции 1 апреля 2009 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик финальной стадии разряда из искусственного облака заряженного водного аэрозоля отрицательной полярности в присутствии группы крупных модельных гидрометеоров. Показано, что при наличии гидрометеоров в промежутке финальная стадия разряда становится существенно слабее по сравнению с разрядом без модельных гидрометеоров. Приведены спектральные характеристики финальной стадии разряда между облаком заряженного аэрозоля и землей, полученные обработкой тока разряда и электромагнитного излучения с помощью вейвлетного анализа. Найдено, что максимальные характерные значения частоты разрядного тока финальной стадии и его электромагнитного излучения в присутствии модельных гидрометеоров в несколько раз меньше, чем без них. Установлены корреляционные зависимости между токовыми и спектральными характеристиками финальной стадии разряда при наличии и отсутствии гидрометеоров в промежутке.

PACS: 92.60.Pw

Введение

Проблема определения условий распространения молнии (в том числе главной стадии) в грозовых облаках является наименее изученной. Гидрометеоры (капли воды различных размеров, замерзающие капли, ледяная крупа различного размера, ледяные кристаллы различной формы, малые и крупные градины и их комбинации) инициируют разрядные явления в электрически активных облаках [1,2] и оказывают существенное влияние на развитие последующих стадий разряда молнии, особенно на ее финальную (главную) стадию, в течение которой происходит быстрая, интенсивная нейтрализация части заряда грозового облака [3,4].

Размеры гидрометеоров в природных облаках оцениваются в диапазоне от долей микрометра до нескольких сантиметров [5,6]. Распределяются различные гидрометеоры по высоте электрически активных (грозовых) облаков существенно неравномерно [7]. Крупные градины (размером более 2 см) выше 10–12 км не наблюдались. Они концентрируются на высоте 2–7 км с максимумом на высоте 3–4 км, ближе к нижней границе грозового облака, с которой, в первую очередь, „контактирует“ формирующаяся главная (финальная) стадия молнии [8,9].

Проблема определения влияния гидрометеоров на условия распространения разрядных явлений (молнии) в природных электрически активных облаках и вблизи них также связана с выяснением электрических характеристик самих облаков, способствующих или препятствующих развитию той или иной формы разряда. По различным оценкам [1], минимальные облачные электрические поля для возникновения коронных стримеров,

которые могли бы вести к формированию лидерных разрядов, при разных типах твердых и жидких гидрометеоров находятся в диапазоне от 2.5 до 9.5 kV/cm. При этом помимо усиления поля крупные гидрометеоры могут являться еще и носителями существенного заряда (до 1000 pC).

Таким образом, наиболее вероятными условиями распространения главной (финальной) стадии разряда молнии в естественных электрически активных облаках предполагается наличие вблизи границ грозовых ячеек областей с напряженностью поля 1.5–15 kV/cm и присутствие в них групп крупных гидрометеоров (в первую очередь, градин сантиметрового диапазона размеров).

Обычно влияние гидрометеоров на формирование разрядных явлений в электрически активных облаках экспериментально исследуется в электродных промежутках с практически однородным электрическим полем [10]. Основное внимание уделяется возможности возникновения коронных разрядов на падающих или подвешенных в промежутке модельных гидрометеорах. Влияние совместного воздействия гидрометеоров на формирование разрядных явлений также привлекает внимание [11,12].

Таким образом, проблемы формирования финальной (главной) стадии разряда молнии и ее взаимодействия с грозовым облаком обычно или не исследовались, или изучались в условиях, часто далеких от реальной грозовой обстановки. Физическое моделирование процессов инициирования и распространения разряда молнии в грозовых облаках и нейтрализации облачного заряда в них, с использованием искусственного сильно заряженного облака водного аэрозоля для экспериментального исследования разрядных явлений в этом облаке

заряженного водного аэрозоля в присутствии крупных модельных гидрометеоров, может позволить существенно продвинуться в решении этих проблем.

1. Экспериментальное исследование характеристик финальной стадии разряда из искусственного облака заряженного аэрозоля в присутствии гидрометеоров

Общая характеристика экспериментального комплекса и характерное распределение электрического поля внутри искусственного облака заряженного водного аэрозоля и в промежутке „заряженное аэрозольное облако—заземленная плоскость“ представлены в [13–15]. Экспериментальный комплекс позволяет создавать облака заряженного аэрозоля, которые имеют потенциал до 1.5 MV и могут индуцировать электрические поля до 20 kV/cm вблизи их границ. Схема экспериментального комплекса показана на рис. 1.

Эксперименты проводились при отрицательной полярности искусственного заряженного аэрозольного облака, так как, согласно [1], формирование и взаимодействие финальной стадии разряда молнии с грозовым облаком происходит вблизи области отрицательного облачного заряда. Ток выноса генератора заряженного аэрозоля составлял 110–140 μ A. Напряженность электрического поля вблизи границ облака заряженного водного аэрозоля могла достигать 15–19 kV/cm. В качестве крупных модельных гидрометеоров использовались проводящие цилиндрические частицы размером около нескольких сантиметров. Группа гидрометеоров размещалась в различных частях промежутка „облако заряженного аэрозоля—стержень на заземленной плоскости“.

Для более подробной детализации характеристик финальной стадии разряда на плоскости устанавливался стержневой электрод со сферической вершиной диаметром 50 mm. В течение всех экспериментов высота заземленного стержня была 140 mm. Ток разряда измерялся малоиндуктивным шунтом 1.39 Ω . Электромагнитное излучение финальной стадии разряда измерялось с помощью динамической антенны (реагирующей на скорость изменения электрического поля) и малоиндуктивного шунта 36 Ω . Оба сигнала одновременно регистрировались цифровым осциллографом Tektonix TDS 3052. Напряженность электрического поля и заряд аэрозольного облака контролировались струнным измерителем напряженности поля. Оптическая картина расположения модельных гидрометеоров в промежутке „облако заряженного аэрозоля—стержень на заземленной плоскости“, наличие и отсутствие разрядных явлений в нем, пути распространения финальной стадии разряда в присутствии изолированных частиц фиксировались цифровым фотоаппаратом Canon PowerShot G1 и миниатюрной 9-кадровой программируемой скоростной электронно-оптической камерой K011.

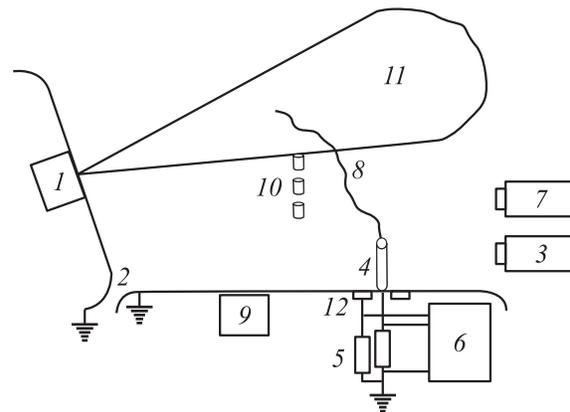


Рис. 1. Схема экспериментального комплекса: 1 — генератор заряженного аэрозоля; 2 — электростатические экраны; 3 — программируемая электронно-оптическая камера; 4 — электрод на заземленной плоскости; 5 — шунты; 6 — цифровой осциллограф; 7 — цифровой фотоаппарат; 8 — разряд; 9 — датчик напряженности электрического поля; 10 — группа изолированных частиц, 11 — заряженное аэрозольное облако, 12 — антенна.

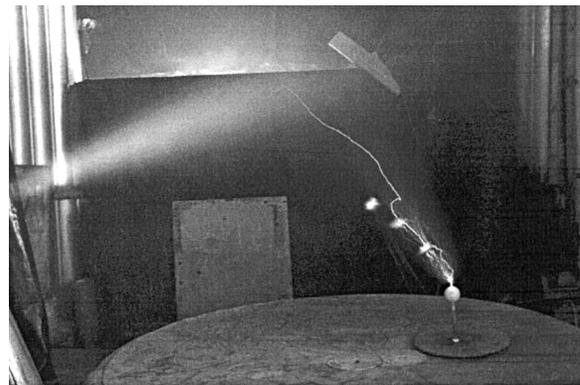


Рис. 2. Типичная картина формирования финальной стадии разряда в присутствии модельных гидрометеоров.

Были выполнены серии экспериментов, при которых формирование финальной стадии разряда между облаком заряженного водного аэрозоля и землей в присутствии группы модельных гидрометеоров и без них изучалось при одинаковых внешних атмосферных условиях и режимах работы генератора заряженного аэрозоля.

В ходе экспериментов было установлено, что модельные гидрометеоры, находящиеся внутри облака заряженного водного аэрозоля или близко к его границам, слабо влияют на процессы возникновения и развития финальной (главной) стадии разряда. В то же время если группа модельных гидрометеоров размещалась в области между границей облака заряженного аэрозоля и вершиной стержневого электрода, несколько гидрометеоров участвовали в иницировании и „направлении“ финальной стадии разряда между искусственным заряженным аэрозольным облаком и землей. Характерные фотогра-

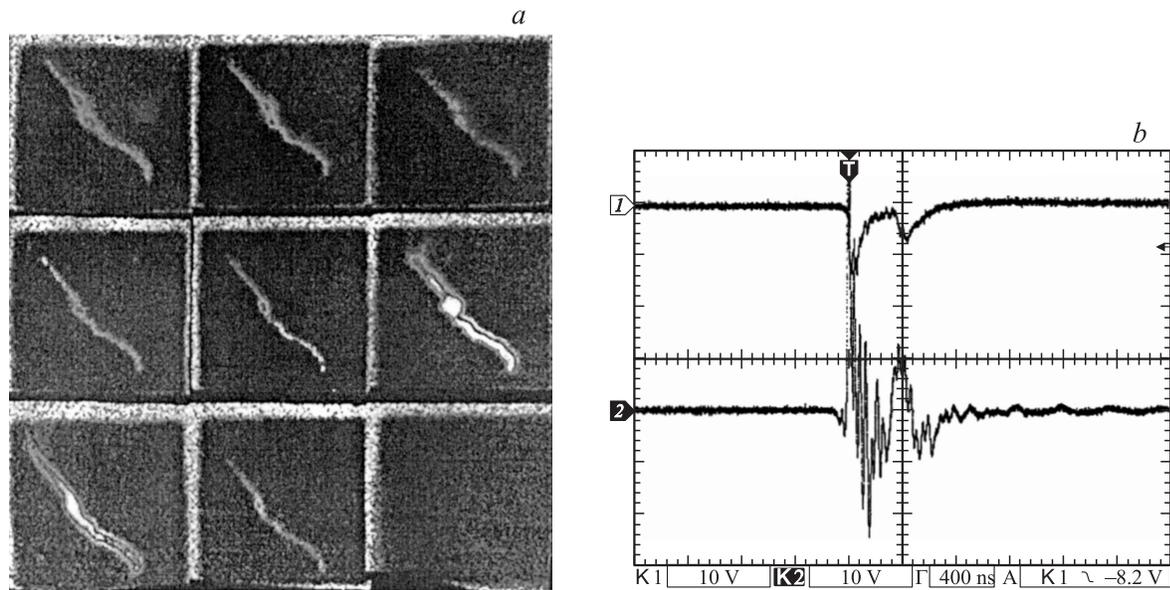


Рис. 3. Формирование финальной стадии разряда в присутствии модельных гидрометеоров: *a* — оптическая картина, зарегистрированная электронно-оптической камерой (размер кадра 85×85 см, длительность кадра $0.1 \mu\text{s}$, пауза между кадрами $0.1 \mu\text{s}$), *b* — осциллограммы тока финальной стадии разряда (*I* — шунт 1.39Ω) и тока смещения на антенне (*2* — шунт 36Ω).

Характеристики финальной стадии разряда между облаком заряженного аэрозоля и землей

Измеренные величины	Средние значения измеренных параметров и их диапазон	
	без модельных гидрометеоров	с модельными гидрометеорами
Максимальная амплитуда тока разряда, I_{max} , А	15.7 (4–47)	6.6 (2.1–10.6)
Максимальная скорость нарастания тока разряда, dI/dt , А/нс	2.28 (0.3–9.3)	0.38 (0.028–1.1)
Максимальная амплитуда тока смещения, $I_{\text{dis_max}}$, А	1.83 (0.63–4.05)	0.93 (0.33–1.7)
Максимальная скорость нарастания тока смещения, dI_{dis}/dt , А/нс	0.33 (0.042–1.4)	0.063 (0.012–0.19)
Продолжительность финальной стадии разряда, T_f , μs	0.35 (0.18–0.5)	0.87 (0.27–2.47)
Заряд, нейтрализованный в течение финальной стадии, Q_f , μC	3.72 (0.87–6.88)	4.31 (1.11–8.09)
Максимальный диаметр области свечения канала, D , см	9.68 (3.1–18.1)	5.28 (2.3–8)
Длина канала финальной стадии разряда, L , м	0.79 (0.49–0.98)	0.68 (0.43–0.82)
Средняя скорость продвижения предшествующего лидера, v_l , см/ μ	0.97 (0.24–1.64)	1.79 (1.2–2.69)

фия, оптическая картина, зарегистрированная программируемой 9-кадровой электронно-оптической камерой, и осциллограммы токов разряда и смещения (сигнала с антенны) для такого разряда показаны на рис. 2 и 3.

Полученные характеристики финальной стадии разряда между заряженным аэрозольным облаком и землей без группы модельных гидрометеоров в промежутке и при их присутствии обобщены в таблице.

2. Анализ результатов экспериментов

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что наличие модельных гидрометеоров в промежутке „облако заряженного аэрозоля—стержень на заземленной плоскости“ существенно влияет на характеристики финальной стадии разряда из облака заряженного аэрозоля.

Найдено, что, когда группа модельных гидрометеоров размещается в промежутке „заряженное аэрозольное облако—стержень на заземленной плоскости“, формирование и развитие финальной стадии разряда проходят в намного более стабильной форме, чем при отсутствии гидрометеоров. Однако оптическое и электромагнитное излучение и ток финальной стадии разряда намного сильнее без модельных гидрометеоров в промежутке. Таким образом, в случае присутствия группы модельных гидрометеоров в промежутке „облако заряженного аэрозоля—заземленный стержень на плоскости“ финальная стадия разряда становится существенно слабее по сравнению с разрядом без модельных гидрометеоров.

При наличии гидрометеоров существенно уменьшаются поперечные размеры области свечения канала финальной стадии разряда D (в 1.5–2.5 раза) и интенсивность излучения канала (в 4–8 раз).

Максимальная амплитуда тока финальной стадии разряда I_{\max} в присутствии гидрометеоров становится в 1.5–2.5 раза меньше. В несколько раз также падает и максимальная амплитуда тока смещения $I_{\text{dis_max}}$ при формировании финальной стадии разряда (скорость изменения электрического поля в месте расположения антенны). При наличии модельных гидрометеоров в промежутке примерно в 5–8 раз становится меньше максимальная крутизна тока разряда финальной стадии dI/dt и тока смещения dI_{dis}/dt .

Присутствие гидрометеоров в промежутке „облако заряженного аэрозоля—стержень на заземленной плоскости“ существенно влияет на взаимозависимость параметров финальной стадии разряда. Так, в случае отсутствия гидрометеоров в промежутке наблюдаются явные, близкие к прямо пропорциональным, зависимости между максимальной крутизной тока разряда финальной стадии и максимальной амплитудой тока (рис. 4, *b*) и между максимальной амплитудой тока смещения и максимальной крутизной тока разряда (рис. 5, *b*). В присутствии группы модельных гидрометеоров такой явной корреляции между указанными характеристиками не наблюдается (рис. 4, *a*, 5, *a* соответственно).

Такое существенное различие в токовых характеристиках финальной стадии разряда из облака заряженного водного аэрозоля при наличии гидрометеоров и в их отсутствие может быть связано с тем, что скорость распространения лидерного разряда в промежутке „облако заряженного аэрозоля—стержень на заземленной плоскости“ в случае присутствия группы модельных гидрометеоров становится в несколько раз больше, чем при их отсутствии (см. таблицу). Это связано с тем, что

хорошо проводящие последовательно расположенные крупные гидрометеоры усиливают электрическое поле на пути распространения восходящего лидерного разряда, сами служат хорошо проводящими участками канала лидера, на создание которых не затрачиваются время и энергия. Как итог, скорость распространения лидерного разряда существенно возрастает. При этом величина заряда, выносимого лидером в промежуток при его продвижении, наоборот, уменьшается. В результате при финальной стадии разряда, когда одним из процессов является нейтрализация оставленного предшествующим лидером заряда, в присутствии гидрометеоров финальная стадия разряда существенно слабее, чем при их отсутствии.

При наличии в промежутке групп модельных гидрометеоров существенно возрастает длительность финальной (главной) стадии разряда из облака заряженного аэрозоля. Длительность главной стадии разряда в отсутствие групп гидрометеоров обычно находится в диапазоне

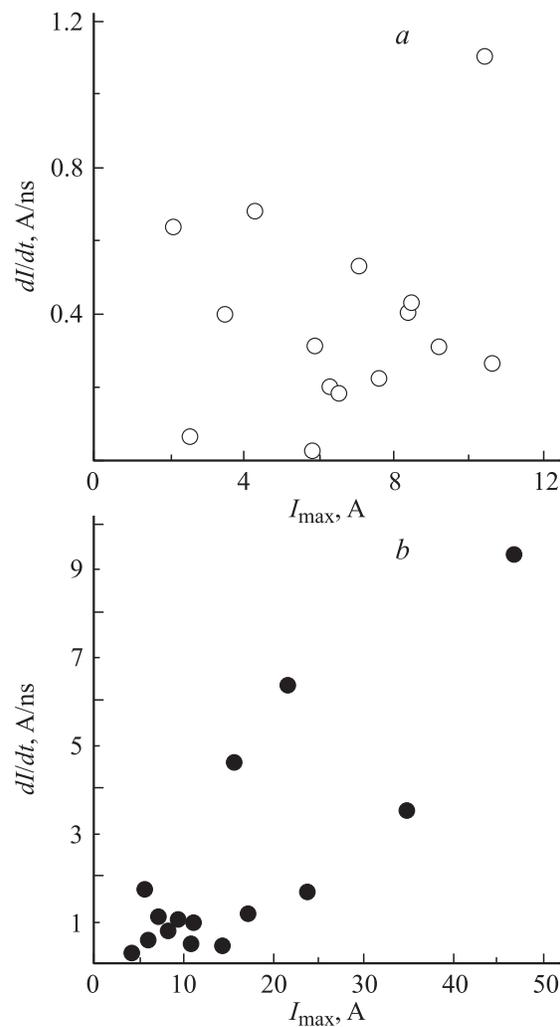


Рис. 4. Зависимость между максимальной скоростью нарастания тока разряда и максимальной амплитудой тока финальной стадии: *a* — с модельными гидрометеорами; *b* — без модельных гидрометеоров.

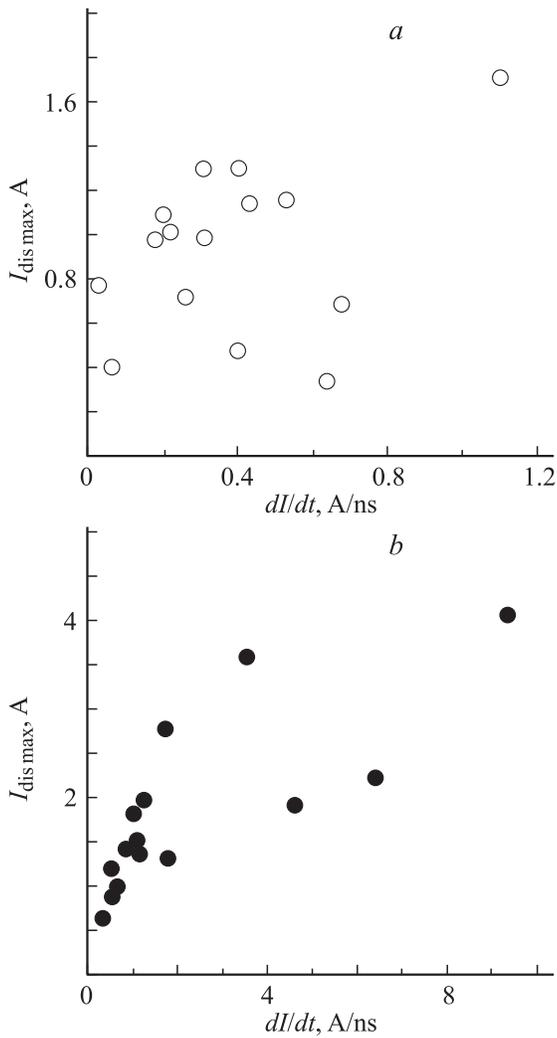


Рис. 5. Зависимость между максимальным током смещения и максимальной скоростью нарастания тока финальной стадии разряда: *a* — с модельными гидрометеорами; *b* — без модельных гидрометеоров.

от 200 до 400 ns, тогда как наличие изолированных частиц увеличивает ее до 500–800 ns и более. Это связано с тем, что в присутствии гидрометеоров более вероятен многовспышечный (две или три последовательных вспышки) характер формирования финальной стадии разряда (примерно 70%), а без гидрометеоров наиболее вероятен случай одиночного характера развития разряда (55%). Типичные осциллограммы тока разряда и тока смещения в случае формирования главной стадии как последовательности нескольких вспышек показаны на рис. 3, *b*. При этом в присутствии модельных гидрометеоров в промежутке в большинстве случаев несколько возрастает (в среднем на 15–30%) величина заряда, протекшего (нейтрализованного) в течение финальной стадии разряда из облака заряженного аэрозоля (см. таблицу).

Многовспышечный характер главной (финальной) стадии разряда из облака заряженного аэрозоля мо-

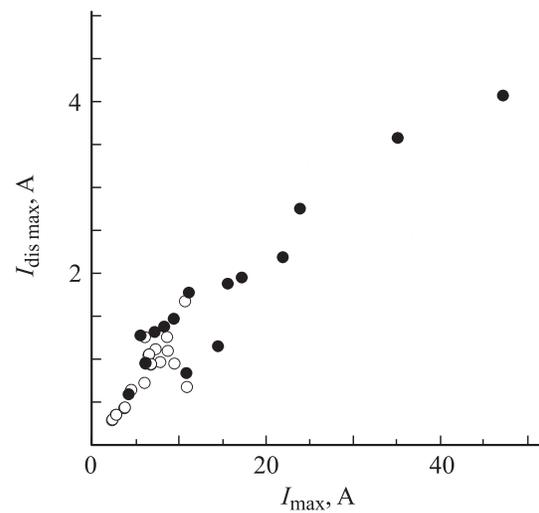


Рис. 6. Зависимость между максимальной амплитудой тока смещения и максимальной амплитудой тока разряда финальной стадии: ● — без модельных гидрометеоров; ○ — с модельными гидрометеорами.

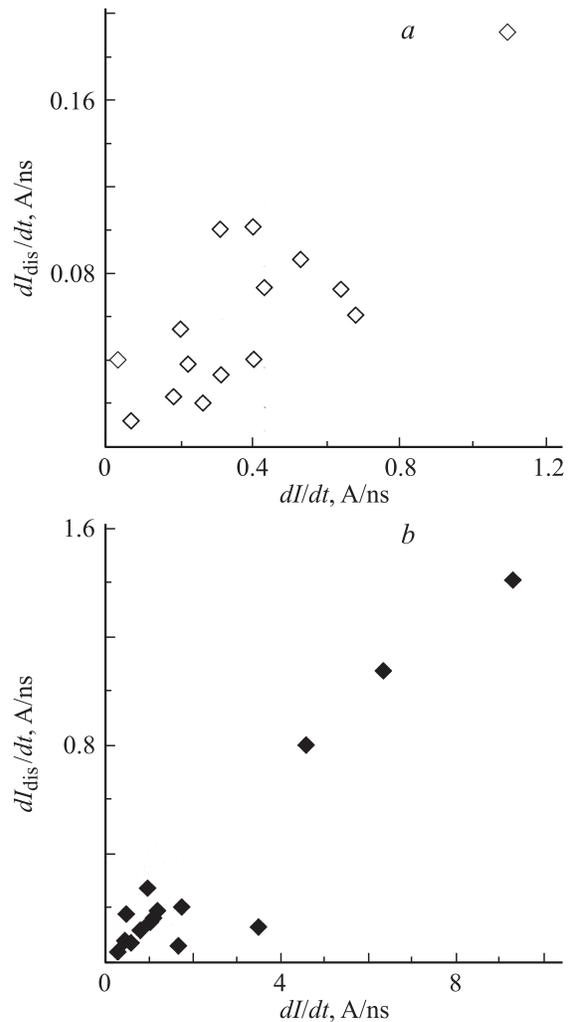


Рис. 7. Зависимость между максимальной скоростью нарастания тока смещения и максимальной скоростью нарастания тока финальной стадии разряда: *a* — с модельными гидрометеорами; *b* — без модельных гидрометеоров.

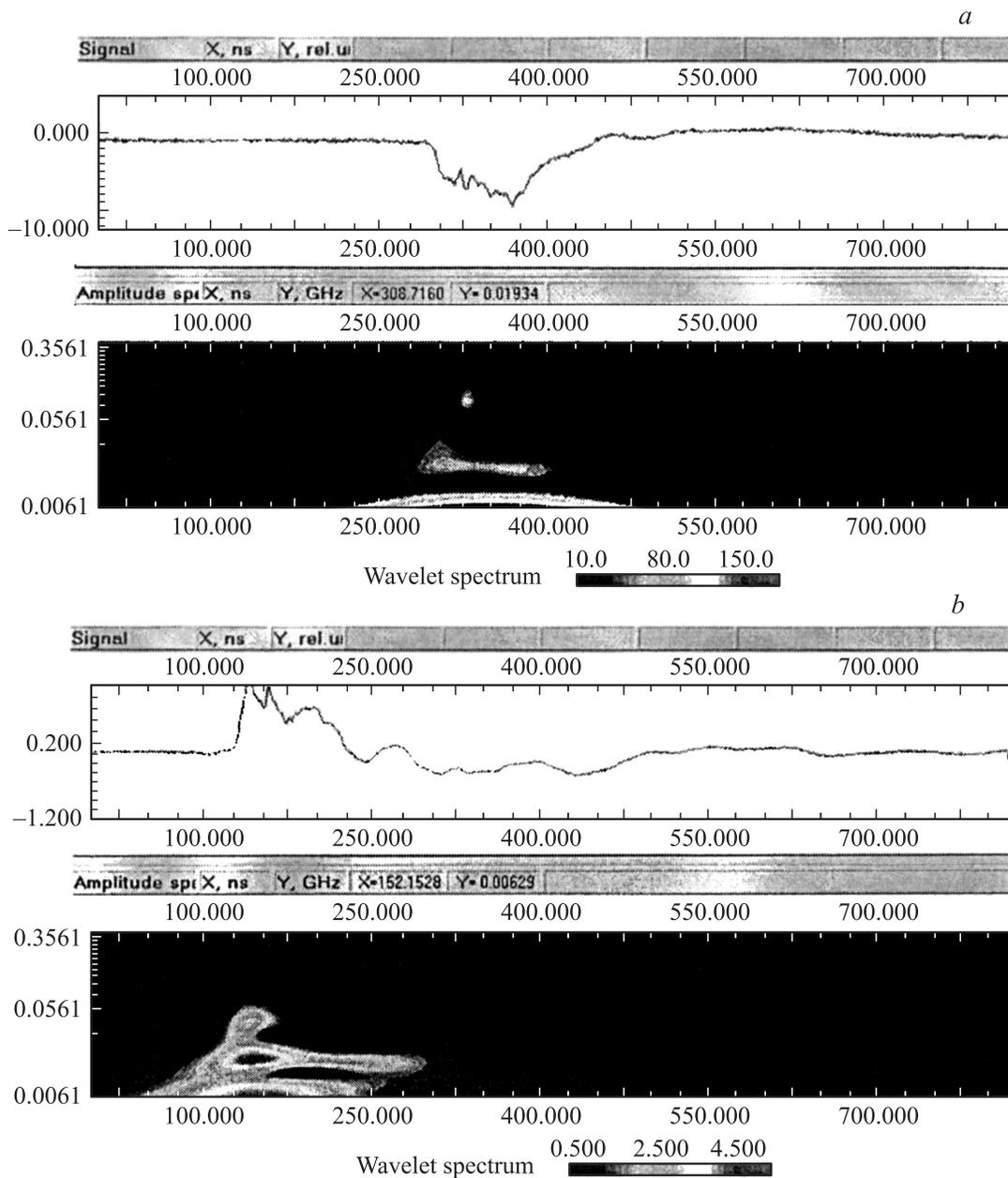


Рис. 8. Вейвлетный спектр финальной стадии разряда между заряженным аэрозольным облаком и заземленным стержнем в случае присутствия группы гидрометеоров: *a* — для тока разряда; *b* — для сигнала антенны.

жет определяться последовательным „подключением“ к каналу главного разряда различных участков облака заряженного аэрозоля. Поэтому хорошо проводящие модельные гидрометеоры, расположенные вблизи границ облака, могут служить местами в канале первой вспышки главной стадии, к которым такое „подключение“ может происходить через развитие разрядных процессов со стороны следующего соседнего участка облака заряженного аэрозоля. Так как при наличии гидрометеоров главная стадия разряда в большинстве случаев имеет многовспышечный характер, этим объясняются и существенное увеличение длительности главной стадии,

и возрастание величины протекшего в течение нее заряда, по сравнению со случаем отсутствия модельных гидрометеоров в разрядном промежутке.

В то же время были найдены некоторые общие тенденции для характеристик финальной стадии разряда в промежутке „облако заряженного аэрозоля—заземленный стержень на плоскости“ с гидрометеорами и без них. Для обоих случаев наблюдается практически прямая корреляция как между амплитудами тока разряда и тока смещения (рис. 6), так и между максимальной крутизной тока смещения и тока разряда финальной стадии (рис. 7).

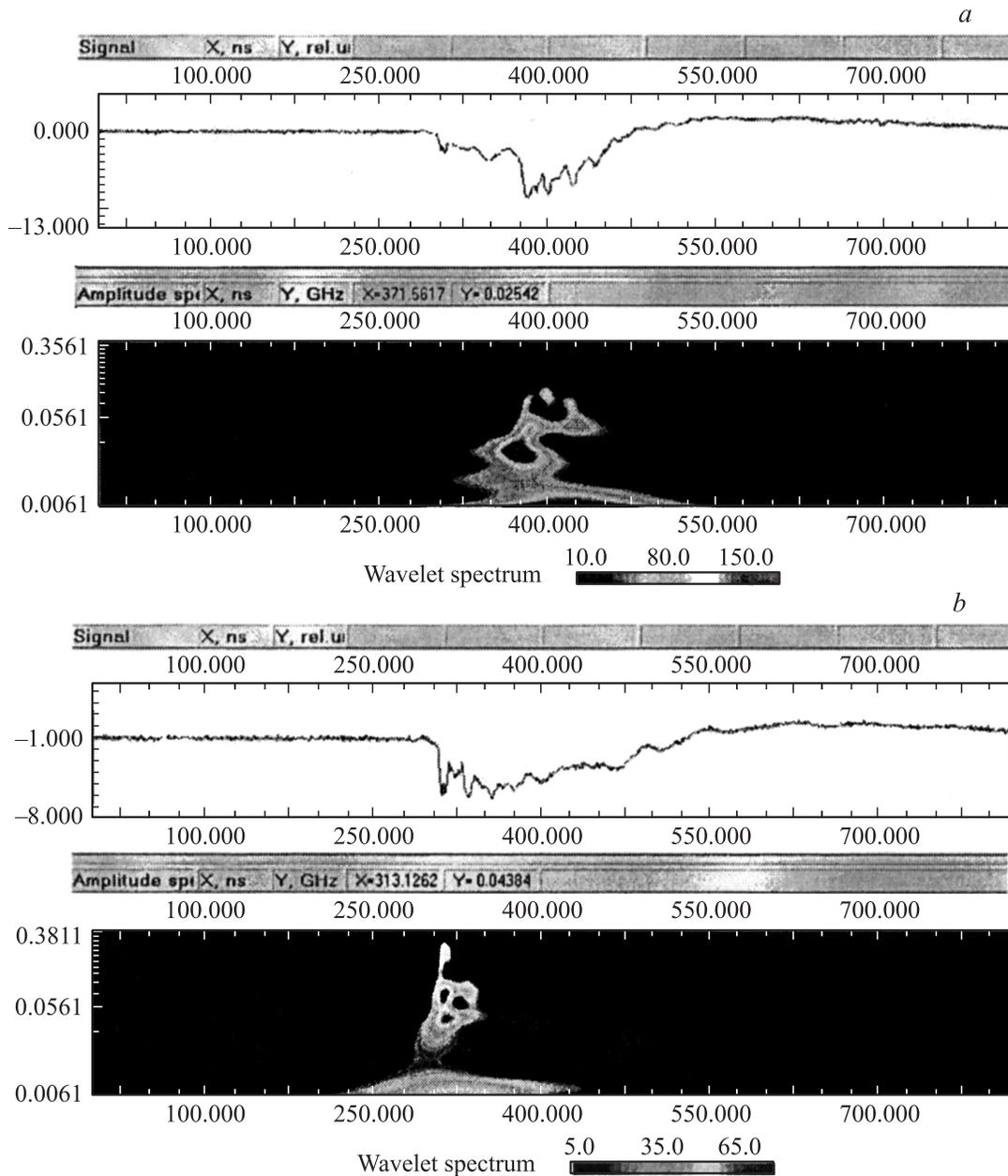


Рис. 9. Вейвлетный спектр финальной стадии разряда между заряженным аэрозольным облаком и заземленным стержнем в случае отсутствия группы модельных гидрометеоров: *a* — для тока разряда; *b* — для сигнала антенны.

3. Спектральные характеристики финальной стадии разряда

Спектральные характеристики финальной стадии разряда между облаком заряженного аэрозоля и землей, полученные в результате обработки тока разряда и электромагнитного излучения с помощью вейвлетного анализа [15], показали существенные отличия для случаев разряда с группой модельных гидрометеоров в промежутке и без них. Когда группа модельных гидрометеоров размещалась в промежутке „заряженное аэрозольное облако—заземленный стержень на плос-

кости“, максимальные характерные значения частоты тока финальной стадии разряда и ее электромагнитного излучения (тока смещения) были в несколько раз меньше ($\sim 50\text{--}100\text{ MHz}$), чем без гидрометеоров ($\sim 150\text{--}300\text{ MHz}$) (рис. 8 и 9 соответственно).

Предполагают, что излучение на таких высоких частотах (более нескольких десятков мегагерц) может вызываться многочисленными локальными искрами при формировании чехла новых каналов разряда в „непотревоженном“ воздухе [16] или наблюдаться при развитии искровых стримерных разрядов в чехле канала предшествовавшего разряда [17]. Причем предполагается, что

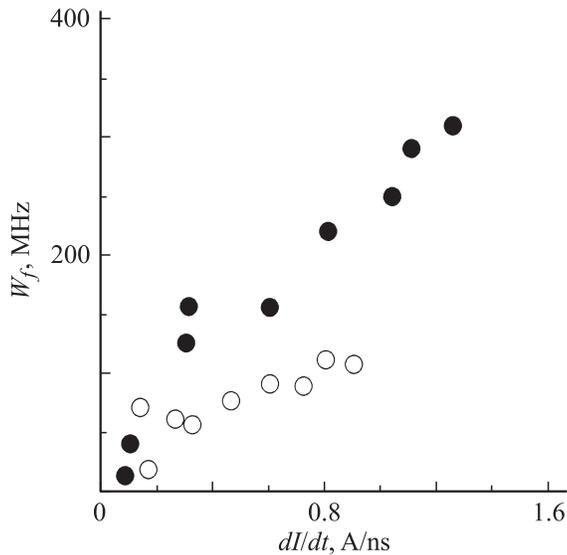


Рис. 10. Зависимость между максимальной частотой вейвлетного спектра тока разряда и максимальной скоростью нарастания тока: ● — без модельных гидрометеоров; ○ — с модельными гидрометеорами.

во втором случае характерные максимумы в спектре мощности излучения будут находиться на значениях частоты, в несколько раз больших, так как будет происходить быстрое и интенсивное развитие пробоя [17]. Также предполагается, что мощность излучения в диапазоне частот 30–300 MHz от положительного лидера слабее, чем от отрицательного лидера [17].

Таким образом, уменьшение максимальных характерных частот тока разряда между облаком заряженного аэрозоля и его электромагнитного излучения в случае присутствия группы крупных модельных гидрометеоров может быть связано с меньшей интенсивностью стримерных разрядов, которые нейтрализуют заряд чехла предшествующего лидера и объемный заряд облака в течение финальной стадии. Это коррелирует с предположением в [18,19], что именно мощные стримерные разряды могут быть причиной интенсивного электромагнитного излучения и генерируют мощный сигнал на таких высоких частотах.

Введение крупных гидрометеоров в промежуток вблизи границ облака заряженного аэрозоля приводит к следующим последствиям:

- 1) разряд инициируется в несколько меньшем внешнем поле облака;
- 2) объемные лидеры, формирующиеся частично на группе гидрометеоров, являются менее интенсивными и в то же время частично разряжают аэрозольное облако. В результате стримерные разряды, развивающиеся на финальной стадии разряда, становятся слабее и продвигаются с меньшей скоростью. Уменьшение облачного заряда, нейтрализуемого в течение финальной стадии, свидетельствует о возможности такого предположения.

В то же время было установлено несколько общих зависимостей для вейвлетных спектров разряда в промежутке „заряженное аэрозольное облако—заземленный стержень на плоскости“ с гидрометеорами и без них. Максимальные характерные значения частоты вейвлетов как тока разряда, так и его излучения прямо пропорциональны максимальной скорости роста тока разряда и тока смещения (рис. 10 и 11 соответственно). Более

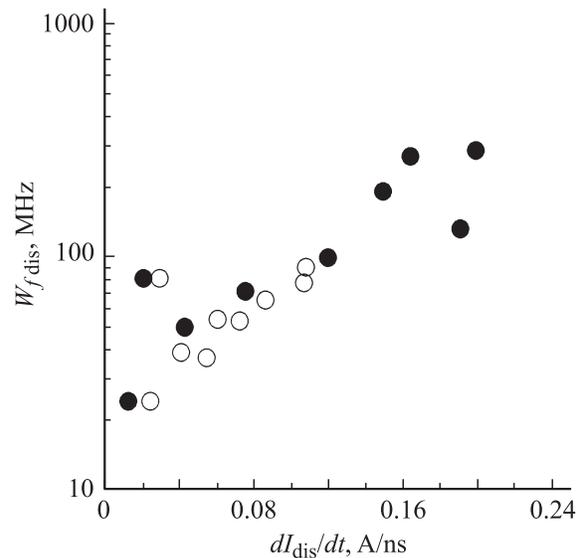


Рис. 11. Зависимость между максимальной частотой вейвлетного спектра электромагнитного излучения разряда и максимальной скоростью нарастания тока смещения: ● — без модельных гидрометеоров; ○ — с модельными гидрометеорами.

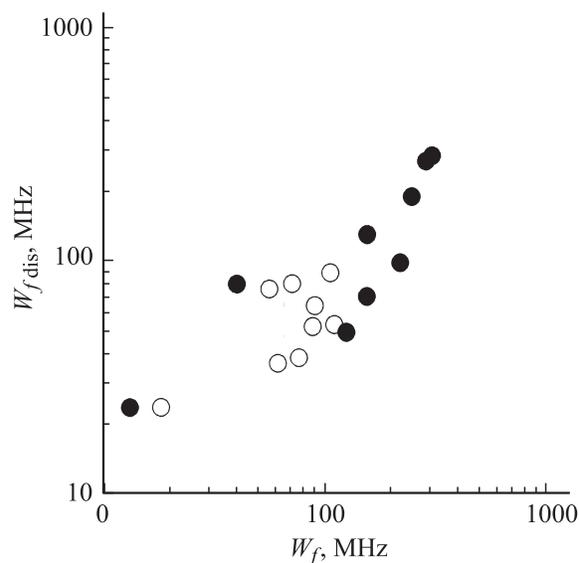


Рис. 12. Зависимость между максимальной частотой вейвлетного спектра электромагнитного излучения разряда и максимальной частотой вейвлетного спектра тока разряда: ● — без модельных гидрометеоров; ○ — с модельными гидрометеорами.

того, было найдено, что максимальные частоты вейвлетных спектров тока разряда и его электромагнитного излучения близки друг к другу (рис. 12).

На основании этого можно предположить, что максимальные значения частоты измеренного электромагнитного излучения разряда молнии могут быть использованы для дистанционного анализа тока молнии, который генерировал это излучение.

Заключение

Таким образом, если группа модельных гидрометеоров с относительно небольшим коэффициентом усиления электрического поля располагается недалеко от границ облака заряженного аэрозоля или в промежутке между облаком и землей, она может существенно влиять на формирование и распространение финальной стадии разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей. Аналогичное влияние модельных гидрометеоров наблюдалось и для других стадий разряда, когда инициирование и развитие разряда из облака заряженного аэрозоля также проходило в намного более стабильной моде в присутствии групп модельных гидрометеоров, чем без них [20,21].

Помимо этого, большинство параметров разряда и его электромагнитного излучения в присутствии модельных гидрометеоров имеют существенно меньшие значения, чем в случае отсутствия гидрометеоров в промежутке. Эта тенденция подтверждается и вейвлетным анализом характеристик разряда. Максимальные характерные значения частоты разрядного тока финальной стадии и его электромагнитного излучения (тока смещения) в присутствии модельных гидрометеоров в несколько раз меньше, чем без них. В то же время для обоих случаев установлена прямая корреляция между максимальными частотами вейвлетных спектров тока разряда и его излучения. Это может позволить использовать данные по измерениям электромагнитного излучения молнии для более детального дистанционного анализа характеристик тока молнии.

Результаты настоящей статьи также показывают, что искусственные гидрометеоры могут успешно применяться для решения проблемы защиты стратегически важных объектов от воздействия молний. При рассеянии искусственных гидрометеоров в грозовом облаке в их окрестности начнутся разрядные процессы, которые могут привести к инициированию молний из грозового облака на безопасных расстояниях от рассматриваемых объектов, и в итоге существенно уменьшить потенциал грозового облака. Таким образом, с помощью искусственных гидрометеоров можно управлять разрядными процессами в грозовом облаке.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-08-50350).

Список литературы

- [1] *Rakov V.A., Uman M.A.* Lightning: Physics and Effects. Cambridge University Press, 2003.
- [2] *Jameson R.A., Murphy M.J., Krider E.P.* // J. Appl. Meteor. 1996. Vol. 11. P. 343.
- [3] *Mansell E.R., MacGorman D.R., Ziegler C.L., Straka J.M.* // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107. N 9. P. 1.
- [4] *Williams E., Cooke C., Wright K.* // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90. N 4. P. 6059.
- [5] *Yuter S.E., Houze R.A.* // Mon. Wea. Rev. 1995. Vol. 123. P. 1964.
- [6] *French J.R., Helsdon J.H., Detwiler A.G., and Smith P.L.* // J. Geophys. Res. 1996. Vol. 101. P. 18 961.
- [7] *Базелян Э.М., Паўзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
- [8] *Williams E., Boldi B., Matlin A., Weber M., Hodanish S., Sharp D., Goodman S., Raghavan R., and Buechler D.* // Atmos. Res. 1999. Vol. 51. P. 245.
- [9] *Blyth A.M., Christian H.J., Deierling W., Ellis S.M., Gadian A.M., Latham J.* // Proc. 12th Int. Conf. on Atmospheric Electricity. Versal. 2003.
- [10] *Crabb J.A., and Latham J.* // Q.J.R. Meteorol. Soc. 1974. Vol. 100. P. 191.
- [11] *Coquillat S., Chauzy S., and Médale J.-S.* // J. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. P. 14 327.
- [12] *Chauzy S., and Kably K.* // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94. P. 13 107.
- [13] *Темников А.Г., Орлов А.В.* // Электричество. 1996. № 8. С. 18.
- [14] *Темников А.Г., Фирсов К.Н., Василяк Л.М. и др.* // ТВТ. 2003. Т. 41. № 2. С. 200.
- [15] *Темников А.Г., Орлов А.В., Болотов В.Н., Ткач Ю.В.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 52.
- [16] *Kawasaki Z.* // IEEJ Trans. 2006. Vol. 126. N 2. P. 61.
- [17] *Chen M.L., Du Y.P., Dong W.S.* // IEEE Trans. 2005. Vol. 125. N 1. P. 97.
- [18] *Smith D.A., Shao X.M., Holden D.N., Rhodes C.T., Brook M., Krehbiel P.H., Stanley M., Rison W., Thomas R.J.* // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 4189.
- [19] *Rhodes C.T., Shao X.M., Krehbiel P.R., Thomas R.J., Hayenda C.O.* // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. P. 13 059.
- [20] *Temnikov A.G., Orlov A.V., Bolotov V.N., Tkach Yu.V.* // Proc. 28th Int. Conf. on Lightning Protection. Kanazawa, 2006. P. 63.
- [21] *Темников А.Г., Орлов А.В., Черненский Л.Л., Писарев В.П.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 10. С. 75.