

УДК 621.311

Исследование влияния гидрометеоров на инициирование разряда из искусственной грозовой ячейки и характеристики его электромагнитного излучения

О.С. Белова, Т.К. Герастенок, Д.С. Журавкова, Н.Ю. Лысов, А.В. Орлов,
А.Г. Темников, Л.Л. Черненский

Сведения об авторах

Белова Ольга Сергеевна — аспирант кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ»

Герастенок Татьяна Константиновна — инженер кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ»

Журавкова Дарья Сергеевна — студент-магистр кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ»

Лысов Николай Юрьевич — старший преподаватель кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ»

Орлов Александр Васильевич — кандидат технических наук, доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ», e-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Черненский Леонид Леонидович — кандидат технических наук, доцент кафедры техники и электрофизики высоких напряжений НИУ «МЭИ»

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния гидрометеоров на инициирование разряда из искусственной грозовой ячейки отрицательной и положительной полярности. С помощью вейвлетного анализа выполнено исследование спектральных характеристик электромагнитного излучения разрядов, формирующихся с участием гидрометеоров. Установлено, что в зависимости от полярности облака гидрометеоры провоцируют формирование облачных, канальных и диффузных разрядов между облаком и землей. Выявлено влияние места расположения массива гидрометеоров в промежутке между облаком и землей на вероятность инициирования разряда и характер спектра его электромагнитного излучения. Найдено, что при положительной полярности облака наибольшая вероятность инициирования облачных разрядов достигается при частичном нахождении группы гидрометеоров в облаке, а при отрицательной полярности — при нахождении массива гидрометеоров вблизи нижней границы облака. Для формирования канальных разрядов с участием гидрометеоров установлена обратная тенденция. Анализ спектра электромагнитного излучения показал, что при формировании облачных разрядов с участием гидрометеоров при отрицательной полярности грозовой ячейки с вейвлетном спектре выделяется диапазон частот, превышающих 1 ГГц. Для облачных разрядов на гидрометеорах предельные частоты и частоты, соответствующие максимальной интенсивности, в вейвлетных спектрах сигналов при отрицательно заряженном облаке существенно выше, чем при положительно заряженной ячейке. Аналогичная тенденция установлена для канальных разрядов между облаком и землей, формирующихся с участием гидрометеоров. Таким образом, наличие в грозовом облаке областей с достаточно большой концентрацией крупных гидрометеоров может существенно модифицировать процессы инициирования и распространения разрядов, формирующихся внутри грозового облака и между грозовым облаком и землей, и спектр их электромагнитного излучения.

Ключевые слова: искусственная грозовая ячейка, положительная и отрицательная полярности, массив гидрометеоров, молния, облачные и канальные разряды, электромагнитное излучение, вейвлетный анализ, спектральные характеристики.

Studying the influence of hydrometeors on discharge initiation from an artificial thunderstorm cell and the characteristics of its electromagnetic radiation

O.S. Belova, T.K. Gerastenok, D.S. Zhuravkova, N.Y. Lysov, A.V. Orlov,
A.G. Temnikov, L.L. Chernensky

Information about authors

Belova Olga S. — Ph.D.-student of high voltage engineering and electrical physics dept., MPEI

Gerastenok Tatyana K. — engineer of high voltage engineering and electrical physics dept., MPEI

Zhuravkova Darya S. — master's student of high voltage engineering and electrical physics dept., MPEI

Lysov Nikolay Yu. — senior lecturer of high voltage engineering and electrical physics dept., MPEI

Orlov Aleksandr V. — Ph.D. (Techn.), assistant professor of high voltage engineering and electrical physics dept., MPEI

Temnikov Aleksandr G. — Ph.D. (Techn.), assistant professor of high voltage engineering and electrical physics dept., MPEI, e-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Chernensky Leonid L. — Ph.D. (Techn.), assistant professor of high voltage engineering and electrical physics dept., MPEI

Results from experimental investigations aimed at studying the influence of hydrometeors on initiating discharge from an artificial thunderstorm cell having negative and positive polarity are presented. The spectral characteristics of electromagnetic radiation from the discharges generated with participation of hydrometeors are investigated using a wavelet analysis. It has been found that depending on the cloud polarity, hydrometeors may initiate the formation of cloud discharges, as well as channel and diffuse discharges between the cloud and ground. The effect the hydrometeor array location in the cloud-to-ground gap has on the discharge initiation probability and on the spectral pattern of its electromagnetic radiation is clarified. It has been found that with a positively charged cloud, the cloud discharge initiation probability reaches its maximum when a group of hydrometeors partially locates in the cloud, and with a negatively charged cloud, its maximum is reached when the array of hydrometeors locates near the cloud lower boundary. As regards the formation of channel discharges with participation of hydrometeors, the opposite tendency has been revealed. An analysis of the electromagnetic radiation spectrum has shown the following. The wavelet spectrum of a cloud discharge generated from a negatively charged thunderstorm cell with participation of hydrometeors contains a band of frequencies exceeding 1 GHz. It has also been found that in case of hydrometeor-initiated cloud discharges, the limiting frequencies and the frequencies corresponding to the maximal intensity that appear in the wavelet spectra of signals are significantly higher for a negatively charged cloud than they are for a positively charged cell. A similar tendency has been found for channel discharges formed between the cloud and ground with the participation of hydrometeors. Thus, if a thunderstorm cloud contains zones with a sufficiently high concentration of large hydrometeors, this may significantly modify the initiation and propagation of discharges formed inside the thunderstorm cloud and between the cloud and ground, as well as the spectrum of their electromagnetic radiation.

Key words: artificial thunderstorm cell, positive and negative polarity, hydrometeor array, lightning, cloud and channel discharges, electromagnetic radiation, wavelet analysis, spectral characteristics.

Введение

Определение условий инициирования молнии в грозовых облаках является одной из актуальных проблем физики молнии [1, 2]. На сегодняшний день существует две гипотезы инициирования молнии в грозовых облаках: пробой на убегающих электронах [3] и группами крупных гидрометеоров [4]. В последние годы гидрометеорная гипотеза снова в центре внимания. Экспериментальные исследования с использованием сильных электрических полей направлены на выявление влияния характеристик массива гидрометеоров на инициирование и развитие разряда [5, 6]. Помимо этого, актуальны проблемы активного воздействия на грозовые облака и искусственного инициирования молнии различными способами (например, триггерные молнии, лазерное инициирование молнии) [7–9], чтобы не допускать формирования разряда молнии в месте расположения объектов, воздействие молнии на которые может приводить к катастрофическим последствиям или неприемлемому ущербу. Одним из таких способов может быть введение специальных гидрометеоров в грозовое облако для провоцирования внутриоблачных разрядов молнии и разрядов молнии в землю [7]. Важным моментом для понимания условий инициирования и распространения молнии является выяснение влияния полярности грозовой ячейки на инициирование и развитие в ней и вблизи нее разрядных явлений с участием гидрометеоров. Другой аспект, связанный с гидрометеорами, — выяснение влияния гидрометеоров на параметры спектра электромагнитного излучения разрядных явлений, проходящих с их участием,

так как регистрация оптических характеристик разрядных процессов внутри грозового облака в большинстве случаев мало информативна [10]. Решение этой задачи важно для повышения эффективности работы систем пеленгации молнии, для которых одной из проблем является корректное разделение облачных разрядов и разрядов молнии в землю [11, 12]. Группы крупных гидрометеоров могут оказаться в центральной и верхней частях грозового облака, где могут формироваться облачные разряды, или выпадать в нижнюю часть облака, где формируется разряд молнии в землю. Крупные гидрометеоры могут находиться в положительных или в отрицательных заряженных ячейках грозового облака, поэтому исследование влияния групп гидрометеоров в искусственных грозовых ячейках отрицательной или положительной полярности на инициирование разряда и характеристики его электромагнитного излучения с применением вейвлетного анализа [13] даст возможность продвинуться в решении описанных проблем.

Методика эксперимента и анализ полученных результатов

Экспериментальные исследования влияния групп гидрометеоров на инициирование и распространение разряда между искусственной грозовой ячейкой положительной или отрицательной полярности и землей и на характеристики его электромагнитного излучения были проведены на комплексе «ГРОЗА», основные параметры которого приведены в [14, 15]. Искусственная грозовая ячейка отрицательной или положительной полярности имела объем несколько кубических метров и

потенциал до 1 МВ, когда формирование разряда между заряженным облаком и землей было маловероятно.

Рассматривались четыре варианта расположения массива модельных гидрометеоров в промежутке между искусственным заряженным аэрозольным облаком (искусственной грозовой ячейкой) и землей: внутри заряженного аэрозольного облака (рис. 1, *а*), частично в заряженном облаке (рис. 1, *б*), вблизи нижней границы облака заряженного аэрозоля (рис. 1, *в*), в пространстве между заряженным облаком и землей (рис. 1, *г*).

В качестве массива модельных гидрометеоров использовались электроды цилиндрической и эллипсоидальной формы размером несколько сантиметров и их комбинации. Расстояние между модельными гидрометеорами в группе составляло несколько сантиметров. Количество модельных гидрометеоров в группе — от трех до семи. Общая длина массива модельных гидрометеоров — от 15 до 35 см.

При экспериментах одновременно регистрировались ток разряда (в случае формирования разряда между облаком и землей) и его электромагнитное излучение (в том числе от возникающих в облаке разрядных явлений). Для регистрации электромагнитного излучения использовались три широкополосных плоских антенны. Антенна А1 размещалась на поверхности земли под областью, где располагался массив гидрометеоров, в непосредственной близости от заземленного стержневого электрода (когда он использовался в эксперименте). Антенна А2 — на боковой стене аэрозоль-

ной камеры на высоте нижней границы заряженного облака, примерно напротив группы модельных гидрометеоров. Антенна А3 — на поверхности земли на расстоянии четырех метров от массива гидрометеоров. Для регистрации тока и электромагнитного излучения использовался цифровой осциллограф DPO 7254 (полоса пропускания 2,5 ГГц, оцифровка данных через 0,4 нс).

Одновременно с электрическими характеристиками регистрировались оптические характеристики разрядных явлений, возникающих на гидрометеорах и в промежутке между искусственной грозовой ячейкой и землей (общая картина разряда в промежутке между облаком и землей и динамика ее формирования цифровым фотоаппаратом Panasonic DMC-50 и программируемой электронно-оптической камерой K011, работающей в диапазоне 400—800 нм).

Для определения спектральных характеристик электромагнитного излучения разрядных явлений, формирующихся с участием гидрометеоров, применялся вейвлетный анализ, который позволял связать характерные частоты регистрируемых сигналов с особенностями формирования разряда в искусственной грозовой ячейке с участием гидрометеоров и с параметрами самих разрядных явлений. В качестве рабочего вейвлета при анализе экспериментальных результатов использовался вейвлет «Мексиканская шляпа», который служит для анализа сигналов, регистрируемых при возникновении разрядных явлений в грозовом облаке и

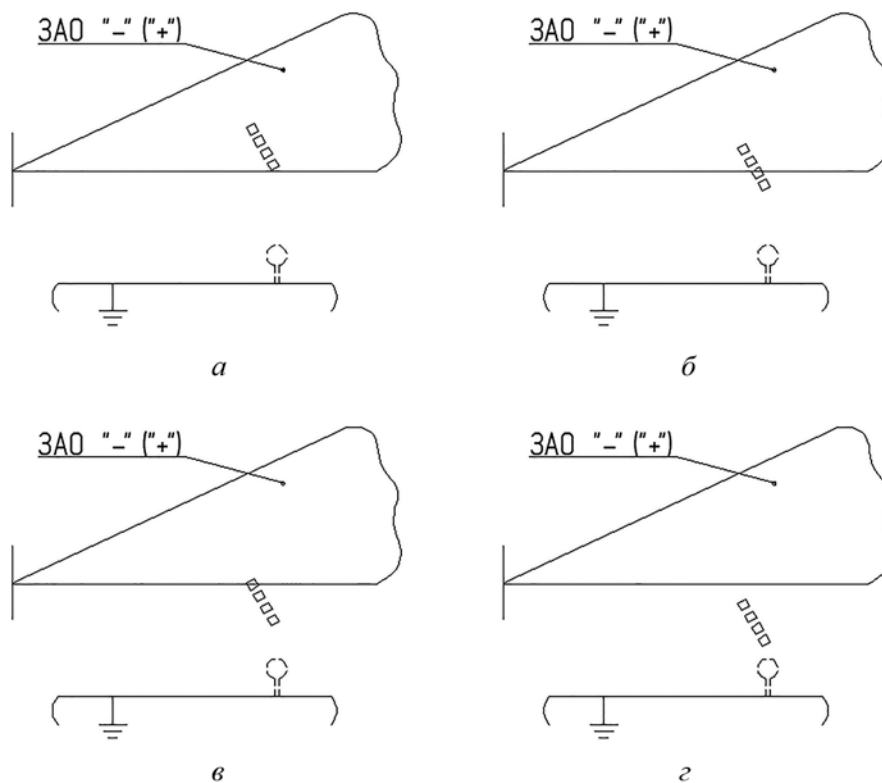


Рис. 1. Характерные варианты расположения группы гидрометеоров в промежутке между заряженным аэрозольным облаком (ЗАО) отрицательной или положительной полярности и землей

разрядах молнии [13, 16, 17]. В вейвлетном спектре при анализе выделялись два характерных частотных диапазона: частота $f(C_{\max})$, соответствующая максимальной интенсивности C_{\max} в вейвлетном спектре, предельная частота f_{\max} в вейвлетном спектре (рассматривалась на уровне 10% от максимальной интенсивности вейвлетного спектра).

В ходе проведения экспериментальных исследований для каждой полярности искусственной грозовой ячейки было выполнено более двухсот экспериментальных подходов.

Экспериментальные результаты и их анализ

Экспериментальные исследования влияния групп гидрометеоров на инициирование и развитие разряда из искусственной грозовой ячейки выявили три возможных формирования разряда между облаком и землей при отрицательной (облачные разряды на гидрометеорах, канальные разряды с участием гидрометеоров и канальные разряды, проходящие мимо гидрометеоров) и положительной полярностях (разряды между облаком и землей: облачные разряды на гидрометеорах, канальные разряды с участием гидрометеоров, диффузные разряды с участием гидрометеоров) облака.

Анализ результатов экспериментов показал влияние полярности искусственной грозовой ячейки и места расположения массива гидрометеоров на вероятность инициирования разряда из облака и на характерные частоты в спектре электромагнитного излучения разрядов с участием гидрометеоров.

В случае размещения массива гидрометеоров в центральной части грозовой ячейки любой полярности (см. рис. 1, а), гидрометеоры практически никак не участвуют в формировании разряда.

При отрицательной полярности искусственной грозовой ячейки наибольшая вероятность инициирования облачных разрядов на гидрометеорах (25—30%) достигается в случае их расположения вблизи нижней границы облака (см. рис. 1, в). При положительной полярности искусственной грозовой ячейки наибольшая вероятность инициирования облачных разрядов на гидрометеорах (более 50 %) достигается в случае расположения части массива гидрометеоров в пределах облака (см. рис. 1, б). Для формирования канальных разрядов с участием гидрометеоров наблюдается обратная тенденция в зависимости от места расположения массива гидрометеоров в промежутке. При отрицательной полярности искусственной грозовой ячейки наибольшая вероятность инициирования канальных разрядов между облаком и землей с участием гидрометеоров (50—60%) достигается в случае расположения части массива гидрометеоров в пределах облака (рис. 1, б). При положительной полярности искусственной грозовой ячейки наибольшая вероятность инициирования канальных разрядов между облаком и землей с участием гидрометеоров (более 40%) достигается в

случае их расположения вблизи нижней границы облака (см. рис. 1, в). Вероятность формирования диффузных разрядов возрастает более 60%, когда массив гидрометеоров располагается между заряженным облаком и землей (рис. 1, з).

Анализ вейвлетных спектров сигналов электромагнитного излучения, регистрируемых плоскими антеннами при формировании на группах гидрометеоров различных видов разряда, показал, что при отрицательной искусственной грозовой ячейке резко выделяются обе спектральные характеристики облачных разрядов с участием групп гидрометеоров, регистрируемые всеми тремя антеннами (рис. 2, а, рис. 3, а). Предельные частоты в вейвлетных спектрах сигналов в 30—40% случаев превышают 1 ГГц. Аналогичная тенденция наблюдается и для частот, соответствующих максимальной интенсивности в вейвлетном спектре (в 30—60% случаев характерные частоты лежат в диапазоне более 100 МГц). При положительной искусственной грозовой ячейке также выделяются обе спектральные характеристики облачных разрядов с участием групп гидрометеоров, это отличие менее выражено (рис. 2, б, рис. 3, б).

Для облачных разрядов на гидрометеорах обе характерные частоты в вейвлетных спектрах сигналов, регистрируемых всеми тремя антеннами, при отрицательно заряженном облаке существенно выше, чем при искусственной грозовой ячейке положительной полярности (табл. 1). Возможно, одной из причин такого различия является место расположения массива гидрометеоров в промежутке «искусственная грозовая ячейка — земля».

Таблица 1

Характерные частоты (средние значения) вейвлетных спектров сигналов при формировании облачных разрядов из искусственной грозовой ячейки с участием групп гидрометеоров

Номер антенны	f_{\max} , МГц		$f(C_{\max})$, МГц	
	Облако «←»	Облако «→»	Облако «←»	Облако «→»
A1	926	574	162	38
A2	1213	701	223	120
A3	1249	267	246	16

Источником электромагнитного излучения облачных разрядов являются разряды, формирующиеся между модельными гидрометеорами в группе, и стримерные разряды, развивающиеся с гидрометеоров в сторону искусственной грозовой ячейки и в сторону земли. Вклад первых зависит от расстояния между гидрометеорами в группе и скорости формирования разряда между ними. При расстояниях между модельными гидрометеорами в группе несколько сантиметров и скорости формирования разряда от 105 до 107 м/с

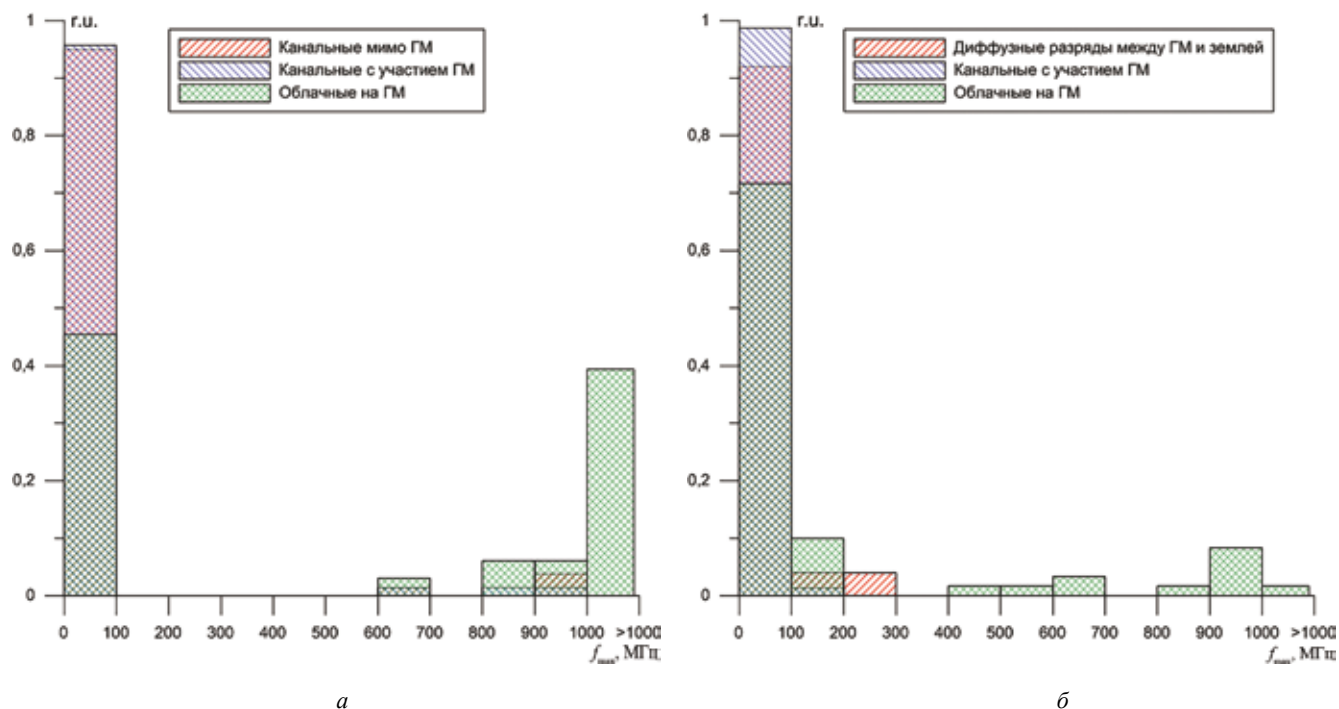


Рис. 2. Гистограммы относительной доли частот с предельной частотой f_{max} в вейвлетном спектре сигналов, регистрируемых антенной АЗ при формировании разрядов на гидрометеорах: отрицательно заряженное облако (а), положительно заряженное облако (б)

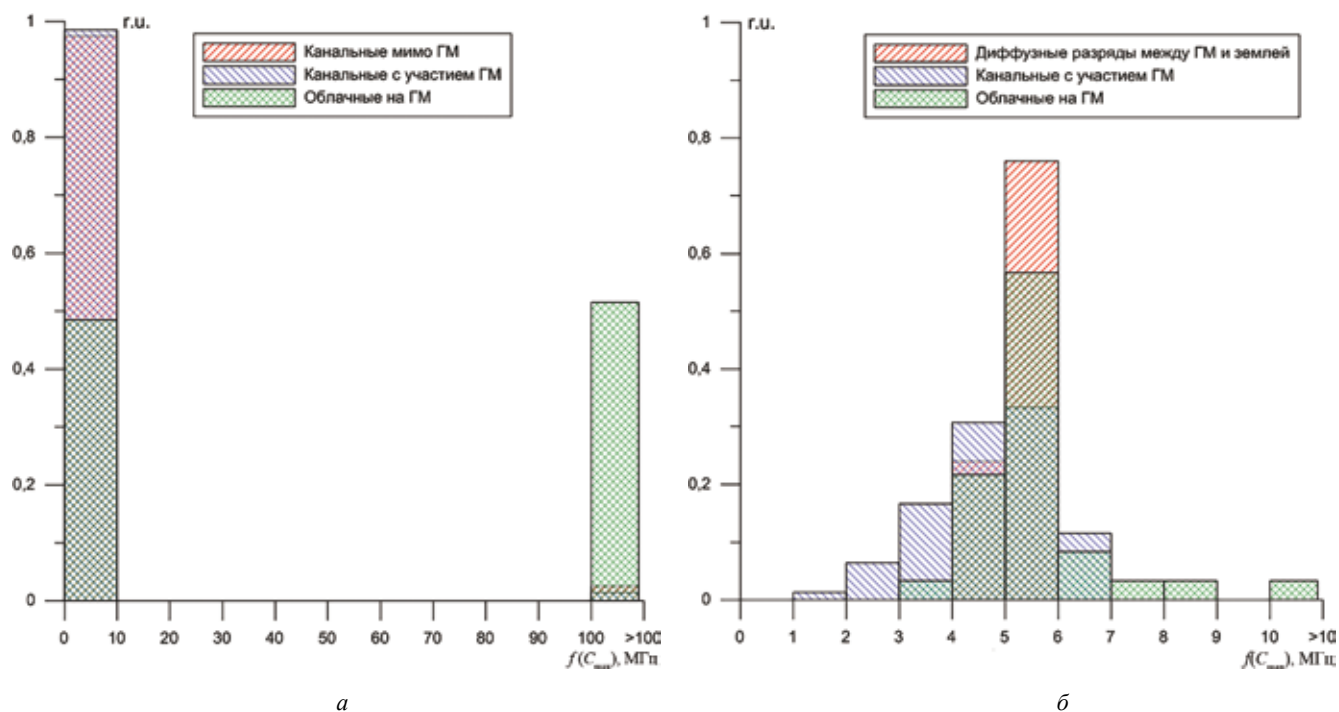


Рис. 3. Гистограммы относительной доли частот, соответствующих максимальной интенсивности $f(C_{max})$ в вейвлетном спектре сигналов, регистрируемых антенной АЗ при формировании разрядов на гидрометеорах: отрицательно заряженное облако (а), положительно заряженное облако (б)

(в зависимости от напряженности поля) для этого вида разряда можно ожидать характерные частоты в спектре электромагнитного излучения в диапазоне десятков и сотен МГц.

При отрицательной полярности искусственной грозовой ячейки максимальная вероятность формирования облачных разрядов на гидрометеорах наблюдалась в том случае, когда массив гидрометеоров располагался вблизи нижней границы облака (см. рис. 1, в). Напряженность электрического поля, создаваемая облаком в этой части промежутка, достигает 14 — 17 кВ/см и способствует быстрому формированию разряда между гидрометеорами в группе. Помимо этого, с верхних гидрометеоров в группе формируются положительные стримерные разряды, развивающиеся внутрь облака, нейтрализуя часть заряда облака в пограничной области, или вдоль его границы, где напряженность поля может достигать 16—18 кВ/см (рис. 4). Такие стримеры могут быть дополнительным источником сверхвысокочастотного излучения.

При положительной же полярности ячейки, максимальная вероятность формирования облачных разрядов на гидрометеорах наблюдалась в том случае, когда группа гидрометеоров частично располагалась в облаке заряженного аэрозоля (см. рис. 1, б). В этом случае отрицательные стримеры, формирующиеся с гидрометеоров, находящихся в облаке, возникали крайне редко и далеко не продвигались [15], и дополнительный вклад в общее электромагнитное излучение облачного разряда давали только положительные стримеры, формирующиеся с нижней группы гидрометеоров и распространяющиеся в электрическом поле заряженного облака с напряженностью 12—14 кВ/см.

Для канальных разрядов, формирующихся между искусственной грозовой ячейкой отрицательной или положительной полярности и землей с участием гидрометеоров, обе характерные частоты в вейвлетных

спектрах сигналов, регистрируемых всеми тремя антеннами, были ближе друг к другу, чем при облачных разрядах (табл. 2). Так как спектр электромагнитного излучения канальных разрядов будет зависеть от длины самого канала и скорости его формирования (при длинах канала разряда от 0,7 до 1,5 м и средних скоростях главного разряда ~ 107 м/с характерные частоты в спектре электромагнитного излучения можно ожидать в диапазоне единиц и десятков МГц).

Таблица 2

Характерные частоты (средние значения) вейвлетных спектров сигналов при формировании канальных разрядов из искусственной грозовой ячейки с участием групп гидрометеоров

Номер антенны	f_{max} , МГц		$f(C_{max})$, МГц	
	Облако «-»	Облако «+»	Облако «-»	Облако «+»
A1	91	125	12,4	6,6
A2	734	437	81	47
A3	57	23,5	10	5,2

В данном случае обе характерные частоты при отрицательной полярности искусственной грозовой ячейки почти для всех антенн были больше, чем при положительной полярности облака. Это связано с тем, что при отрицательно заряженном облаке скорость формирования главной стадии разряда с участием гидрометеоров была в среднем в 1,5 раза больше, чем при положительном облаке. Помимо этого, с канала финальной стадии разряда вблизи границы искусственной грозовой ячейки отрицательной полярности в ряде случаев развивалась стримерная корона (рис. 5), которая давала свой вклад в сверхвысокочастотную часть спектра электромагнитного излучения.

Обработка результатов экспериментов выявила, что в вейвлетном спектре сигнала, регистрируемого антен-

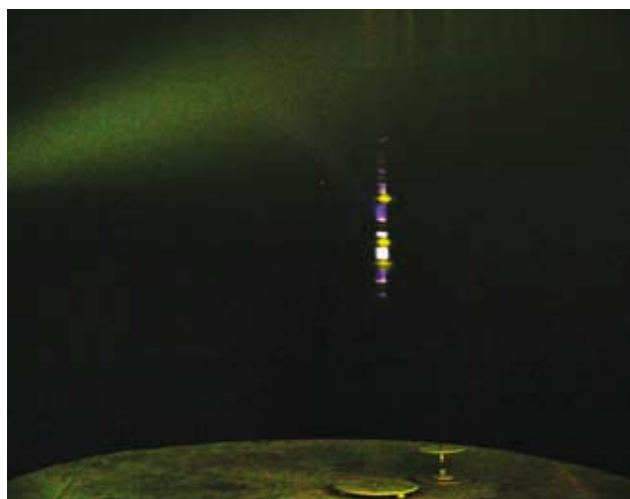


Рис. 4. Облачные разряды, формирующиеся участием группы гидрометеоров при отрицательной полярности искусственной грозовой ячейки



Рис. 5. Канальный разряд с участием гидрометеоров при отрицательной полярности искусственной грозовой ячейки

ной АЗ (антенны, «удаленной» от места формирования разряда в промежутке между облаком и землей), предельные частоты в диапазоне выше 1 ГГц присутствуют (и в большом количестве случаев) только для облачных разрядов как при отрицательной, так и при положительной полярности искусственной грозовой ячейки (см. рис. 2).

При формировании канальных разрядов между облаком и землей (как с участием гидрометеоров, так и проходящих мимо гидрометеоров) такие частоты в вейвлетном спектре для этой антенны отсутствуют. Аналогичная особенность характерна и для частот, соответствующих максимальной интенсивности в вейвлетном спектре электромагнитного излучения канальных разрядов (частоты более 100 МГц бывают в единичных случаях для искусственных грозовых ячеек отрицательной полярности и вообще отсутствуют при положительной полярности облака). В среднем, для этой антенны рассматриваемые характерные частоты для облачных разрядов в 20—25 раз больше, чем в случае канальных разрядов.

Выводы

Таким образом, эксперименты показали, что массивы гидрометеоров по-разному модифицируют процессы инициирования и распространения разряда из искусственного облака заряженного водного аэрозоля отрицательной или положительной полярности. Установлено существенное влияние расположения группы гидрометеоров в промежутке между заряженным облаком и землей на вероятность инициирования разряда из облака и возможную форму его развития. При отрицательной полярности облака наиболее удачным местом для инициирования разряда из искусственной грозовой ячейки являлось расположение гидрометеоров вблизи нижней границы облака. При положительной полярности облака наиболее благоприятным случаем было размещение верхних гидрометеоров группы частично в нижней части искусственной грозовой ячейки. В этом случае разрядные процессы начинаются не с отрицательной лавинной короны с верхних гидрометеоров (что было бы в случае их нахождения вблизи нижней границы заряженного облака, вело к разрядке части облака и локальному снижению напряженности поля в месте расположения гидрометеоров), а формированием разрядов между соседними гидрометеорами и положительными стримеров с нижних гидрометеоров в сторону земли. Возможно, именно массивы крупных гидрометеоров в нижней локально положительно заряженной части грозового облака могут быть инициаторами формирования нисходящей молнии [18].

Также можно ожидать, что наличие в грозовом облаке областей с достаточно большой концентрацией крупных гидрометеоров может существенно модифицировать спектр электромагнитного излучения разрядов, формирующихся внутри грозового облака

и между грозовым облаком и землей. Формирование разрядов между близко расположенными крупными гидрометеорами, находящимися в периферийных частях грозовых ячеек, где локальная напряженность электрического поля внутри грозового облака может достигать максимальных значений, может давать свой вклад в механизмы формирования сверхвысокочастотного излучения компактных внутриоблачных разрядов, развивающихся внутри грозового облака [19]. Такое дополнение следует учитывать для антенн систем пеленгации молнии, работающих в ближней зоне, когда необходимо отделять облачные разряды от молнии типа «облако–земля».

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00160).

Литература

1. **Rakov V.A., Rachidi F.** Overview of Recent Progress in Lightning Research and Lightning Protection // IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. 2009. V. 51. N 3. P. 428—442.
2. **Rakov V.A.** A review of recent progress in studying physics of lightning // Материалы 7 Всерос. конф. по атмосферному электричеству. СПб., 2012.
3. **Gurevich A.V., Zybin K.P., Roussel-Dupre R.A.** Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Phys. Lett. A. 1992. V. 165. P. 463—468.
4. **Nguyen M.D., Michnovsky S.** On the initiation of lightning discharge in a cloud. The lightning initiation on precipitation particles // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 26675—26680.
5. **Petersen D., Bailey M., Hallett J., Beasley W.** Laboratory investigation of corona initiation by ice crystals and its importance to lightning // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2014. Vol. 141. P. 1283—1293.
6. **Mazur V., Taylor C.D., Petersen D.A.** Simulating electrodeless discharge from a hydrometeor array // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2015. V. 120. N 20. P. 10879—10889.
7. **Качурин Л.Г.** Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л: Гидрометеоиздат, 1990.
8. **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией // УФН. 2000. Т. 170. № 7. С. 753—769.
9. **Василяк Л.М. и др.** Исследование электрических разрядов вблизи искусственного заряженного аэрозольного облака и их взаимодействие с лазерной искрой // ТВТ. 2003. Т. 41. № 2. С. 200—210.
10. **Betz H.D., Schumann U., Laroche P.** Lightning: Principles, Instruments and Applications. Review of Modern Lightning Research. Springer, 2009.
11. **Rakov V.A.** Electromagnetic Methods of Lightning Detection, Surveys in Geophysics. 2013. V. 34. N 4. DOI 10.1007/s10712-013-9251-1.

12. Nag A., Murphy M.J., Schulz W., Cummins K.L. Lightning location systems: Insights on characteristics and validation technique. Earth and Space Science. AGU Publ., 2015. DOI: 10.1002/2014EA000051.
13. Esa M.R.M., Ahmad M.R., Cooray V. Wavelet analysis of the first electric field pulse of lightning flashes in Sweden // J. Atmospheric Res. 2014. V. 138. P. 253–267.
14. Темников А.Г., Орлов А.В., Болотов В.Н., Ткач Ю.В. Исследование характеристик искрового разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 7. С. 52—59.
15. Temnikov, A.G. Using of artificial clouds of charged water aerosol for investigations of physics of lightning and lightning protection // IEEE Lightning Protection (ICLP) Intern. Conf. 2012. DOI: 10.1109/ICLP.2012.6344279.
16. Sharma S.R., Cooray V., Fernando M., Miranda F.J. Temporal features of different lightning events revealed from wavelet transform // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 2011. V. 73. P. 507—515.
17. Temnikov A.G., Chernensky L.L., Orlov A.V., Belova O.S., Zimin A.S. Spectral characteristics of discharges from artificial charged aerosol cloud // IEEE Lightning Protection (ICLP) Intern. Conf. 2014. P. 1312—1319. DOI: 10.1109/ICLP.2014.6973333.
18. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: physics and effects. México: Cambridge University Press, 2003.
19. Nag A., Rakov V.A. Compact intracloud lightning discharges: 1. Mechanism of electromagnetic radiation and modeling // J. Geophys. Res. V. 115. D20102. DOI:10.1029/2010JD014235, 2010.

Статья поступила в редакцию 28.04.2016