

Исследование специфики спектральных характеристик электромагнитного излучения разряда между искусственным грозовым облаком и землей

БЕЛОВА О.С., ТЕМНИКОВ А.Г., ЧЕРНЕНСКИЙ Л.Л., ОРЛОВ А.В., ЛЫСОВ Н.Ю., КИВШАР Т.К., ЖУРАВКОВА Д.С.

Представлены результаты экспериментальных исследований электромагнитного излучения разрядов между искусственным грозовым облаком и землей. Выявлено пять возможных вариантов формирования главной стадии разряда между искусственным грозовым облаком и землей: восходящий разряд, встречные и нисходящие разряды, в том числе с радиальной стримерной короной с канала разряда. Найдено, что разные по условиям формирования варианты главной стадии разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей могут проявляться и в специфике создаваемого им электромагнитного излучения, регистрируемого широкополосными антеннами, и его спектра. На основе вейвлетного анализа найдены специфические особенности спектральных характеристик электромагнитного излучения выявленных вариантов разрядов и параметров импульса тока главной стадии разряда. Установлено, что для восходящих разрядов характерны относительно небольшие амплитуды и крутизны импульса тока, но сверхвысокие предельные частоты в вейвлетном спектре их электромагнитного излучения. Наибольшая интенсивность вейвлетного спектра электромагнитного излучения наблюдается для нисходящих разрядов. Найдено, что радиальная стримерная корона с участков канала разряда и/или взаимодействие восходящего и нисходящего лидеров могут приводить к более высоким значениям амплитуды и крутизны импульса тока разряда и характеристик вейвлетного спектра его электромагнитного излучения. Отмечено, что присутствие частотных диапазонов в десятки-сотни мегагерц в вейвлетном спектре электромагнитного излучения разрядов между искусственным грозовым облаком и землей необходимо учитывать при разработке и эксплуатации систем пеленгации молнии.

К л ю ч е в ы е с л о в а: молния, искусственное грозовое облако, разряды, электромагнитное излучение, широкополосные антенны, вейвлетный анализ, спектральные характеристики

Все более широкое внедрение программно-вычислительных комплексов и алгоритмов искусственного интеллекта в системы управления наземных объектов и летательных аппаратов выявило проблему их адекватного функционирования в условиях внешних воздействий, таких например, как молния. Даже успешное срабатывание внешней молниезащиты совсем не исключает выхода из строя таких объектов в результате воздействия электромагнитного излучения разряда молнии различного частотного диапазона [1]. Поэтому требует решения вопрос корректной интерпретации спектральных характеристик электромагнитного излучения молнии, особенно в ближней зоне, и их связи с особенностями формирования и параметрами самого разряда молнии между грозовым облаком и землей [2]. Возможность идентификации разрядных явлений по спектральным характеристикам их электромагнитного излучения является актуальной задачей как для физики молнии и молниезащиты,

так и для усовершенствования систем пеленгации молнии [3, 4].

Регистрация электромагнитного излучения атмосфериков и разрядов молнии выполняется в широком диапазоне частот. При этом предполагается связь между характерными частотами измеряемого сигнала и физическими разрядными процессами, происходящими в грозовом облаке и между грозовым облаком и землей при формировании разряда молнии [5–8]. На этом построены как требования к антенным устройствам, так и сам принцип разделения облачных молний и молний типа «облако–земля» в существующих системах определения места удара и параметров молнии [2, 9]. Предполагается, что для облачных разрядов внутри грозового облака их регистрируемое электромагнитное излучение имеет существенно более высокие характерные частоты, чем в случае нисходящих разрядов молнии в землю. Однако накопившийся опыт эксплуатации таких систем показывает, что для них свойственны существенные ошибки как в разделе-

нии облачных разрядов и разрядов молнии в землю, так и в определении характеристик этих разрядов [2–4]. Современные исследования показывают, что различные электрофизические процессы, сопровождающие формирование нисходящих и восходящих лидеров и их взаимодействие, а также некоторые электрофизические процессы при формировании главного разряда могут формировать электромагнитное излучение разряда молнии «облако – земля» с таким частотным спектром, в котором будут присутствовать диапазоны частот, характерные, как считается, для облачных разрядов молнии [2, 10–12].

Экспериментальные исследования с использованием искусственных грозовых облаков могут помочь выявить возможную специфику спектральных характеристик электромагнитного излучения разрядов между грозовым облаком и землей в зависимости от значимых особенностей формирования разрядов типа «облако–земля».

Экспериментальный комплекс и методика обработки полученных результатов. Для проведения экспериментальных исследований спектральных характеристик электромагнитного излучения разрядных явлений между искусственным грозовым облаком и землей использовался экспериментально-измерительный комплекс «ГРОЗА» (рис. 1), позволяющий создавать протяженные объемы сильно заряженных капель воды потенциалом до 2,0–3,0 МВ с предельной плотностью заряда, соответствующей электрически активным облакам (грозовым ячейкам) [13]. В экспериментальном исследовании использовалась искусственная грозовая ячейка отрицательной полярности, поскольку большая часть (до 90%) реальных молний в землю несут отрицательный заряд. Оптическая картина разряда между искусственным грозовым облаком и землей и динамика его формирования регистрировались цифровым фотоаппаратом, программируемым 9-кадровой электронно-оптической камерой K011 и системой фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Одновременно с оптическими характеристиками регистрировались ток разряда между искусственным грозовым облаком и землей и создаваемое им электромагнитное излучение (цифровой запоминающий осциллограф DPO 7254 с полосой пропускания 2,5 ГГц). Для регистрации электромагнитного излучения использовалась система широкополосных плоских антенн, расположенных на поверхности земли рядом с местом формирования разряда (антенна A1) и на расстоянии нескольких метров от него (антенна A3), на высоте расположения искусственной грозовой ячейки (антенна A2). Характерная осциллограмма тока разряда и сигналов с антенн A1–A3 приведена на рис. 2,а.

При обработке экспериментальных осциллограмм определялись следующие основные характеристики импульса тока главной стадии разряда: амплитуда импульса тока разряда I_p , крутизна импульса тока, соответствующая уровням 0,3–0,9 от максимального тока $a_{0,3}$ и суммарный протекающий заряд Q_{sum} за время длительности импульса тока.

Для определения спектральных характеристик электромагнитного излучения разряда между ис-

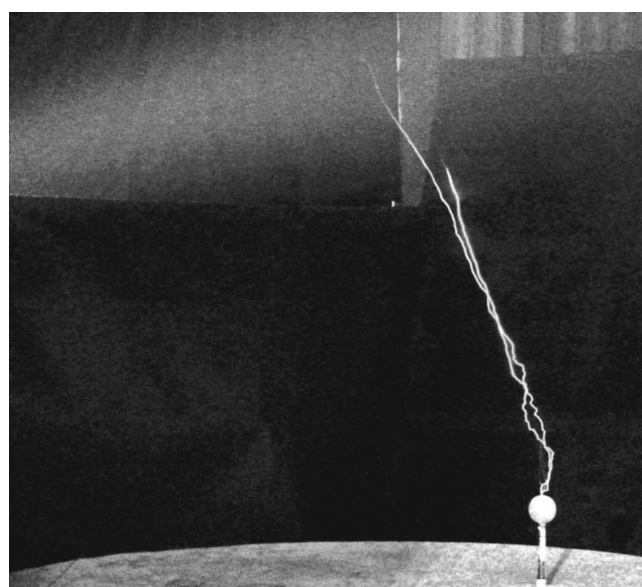
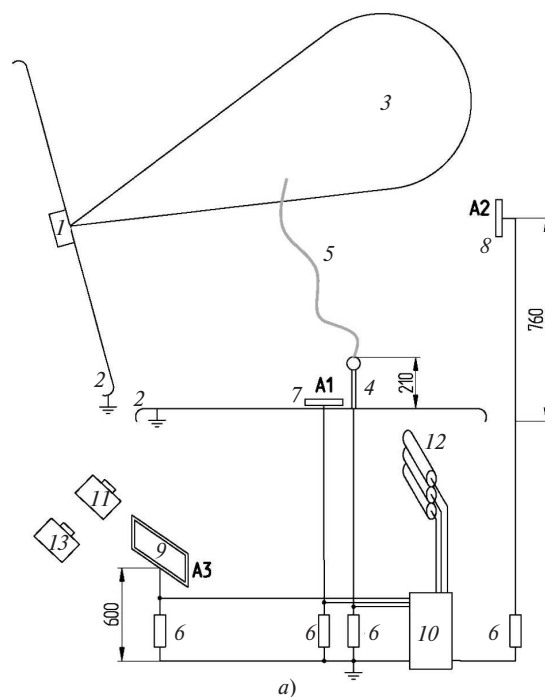


Рис. 1. Экспериментально-измерительный комплекс «ГРОЗА»: 1 – генератор заряженного аэрозоля; 2 – заземленные электростатические экраны; 3 – искусственная грозовая ячейка; 4 – стержневой электрод; 5 – искровой разряд; 6 – шунты; 7–9 – плоские антенны (A1–A3); 10 – цифровой запоминающий осциллограф; 11 – цифровой фотоаппарат; 12 – система ФЭУ; 13 – электронно-оптическая камера

куственным грозовым облаком и землей, регистрируемого антеннами А1–А3, и импульса тока главной стадии разряда применялся вейвлетный анализ, позволяющий получить информацию о спектральном составе сигналов с привязкой к механизмам и особенностям формирования разрядных явлений на каждом рассматриваемом промежутке времени [14–16].

С помощью специально разработанного программного обеспечения и применения базисного вейвлета «Мексиканская шляпа» [17, 18] были построены спектрограммы сигналов тока разряда и его электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами А1–А3 (рис. 2, б). При обработке и анализе полученных спектрограмм для выбранного временного интервала определялись следующие параметры: максимальная частота f_{max} в вейвлетном спектре, частота $f(C_{max})$, соответствующая максимальной интенсивности C_{max} в вейвлетном спектре [19]. Интенсивность C_{max} отображает взаимную интенсивность сигнала и вейвлета и представляет собой мгновенное распределение их взаимной энергии $[C(a,b)]^2$ [20]. Всего были получены и обработаны данные более двухсот экспериментальных подходов.

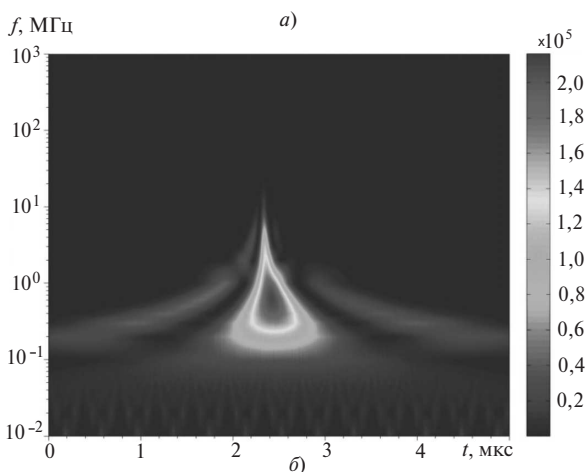


Рис. 2. Характерные осциллограмма тока разряда и сигналов с антенн А1–А3 (а) и вейвлетный спектр импульса тока разряда (б)

Результаты экспериментальных исследований и их анализ. В отличие от ранее проводимых исследований [18, 19], где рассматривалась общая совокупность полученных экспериментальных данных, в статье рассмотрены спектральные характеристики электромагнитного излучения разрядов между искусственным грозовым облаком и землей с учетом специфики формирования главной стадии разряда. На основании анализа оптических и электрических характеристик разряда, развивающегося между облаком и землей, классифицированы пять характерных вариантов формирования главной стадии разряда. Типичная оптическая картина, регистрируемая цифровым фотоаппаратом, и ее динамика во времени, регистрируемая электронно-оптической камерой, приведены для каждого варианта формирования главной стадии на рис. 3–7.

Вариант 1. Финальная стадия, формирующаяся в результате развития восходящего разряда с земли и характеризующаяся отсутствием радиальной стримерной короны с канала разряда (рис. 3).

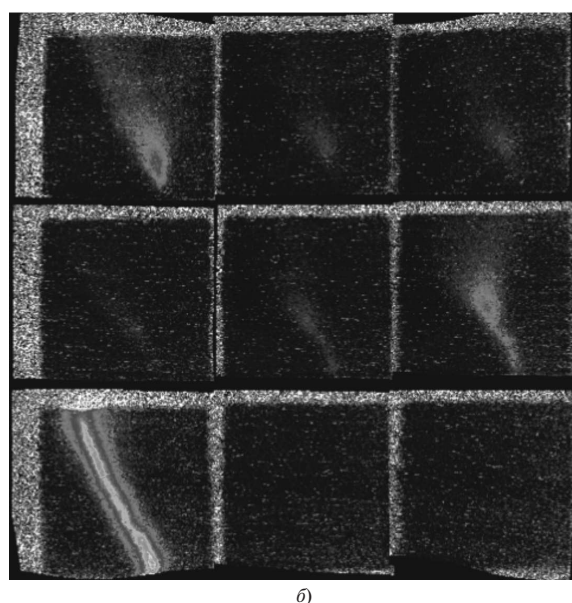
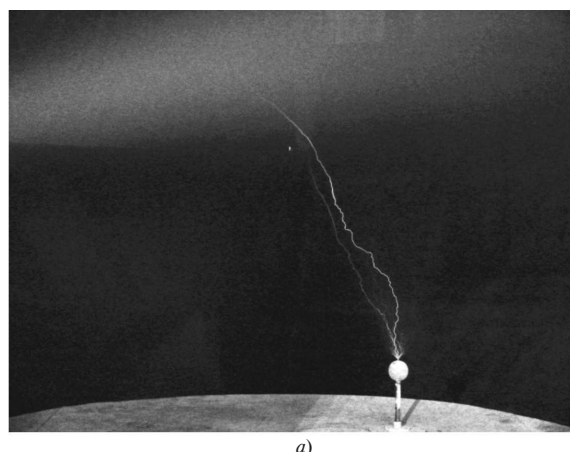
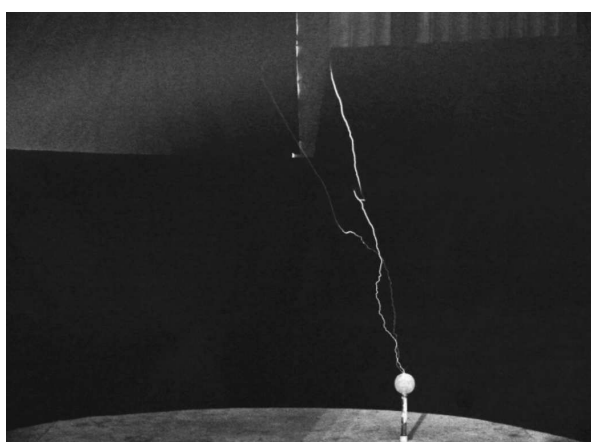


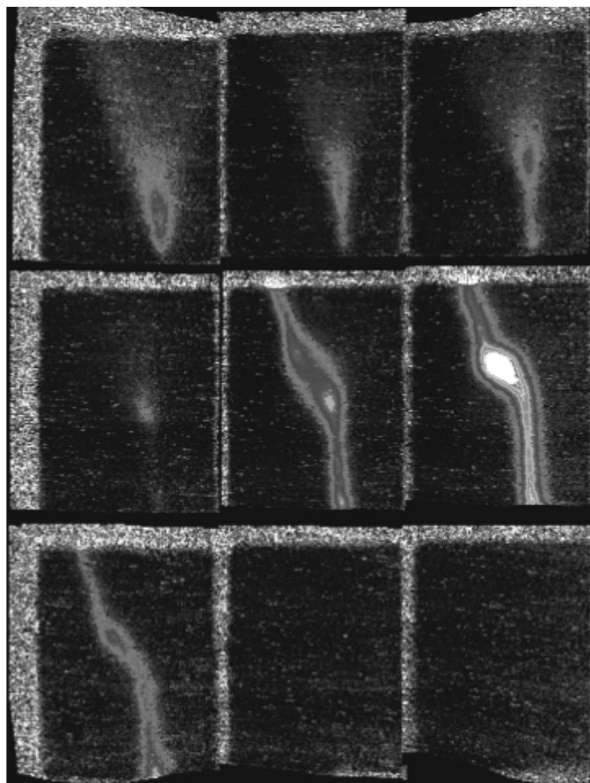
Рис. 3. Вариант 1: фотография (а); покадровая развертка формирования главной стадии разряда (б) (размер кадра 75×75 см, длительность кадра 3,5 мкс, межкадровая пауза 0,1 мкс)

Вариант 2. Главная стадия, формирующаяся в результате взаимодействия нисходящего разряда из искусственной грозовой ячейки и встречного восходящего разряда с земли и характеризующаяся отсутствием радиальной стримерной короны с канала разряда (рис. 4).

Как видно на покадровой развертке электронно-оптической камеры (рис. 4,б), формирование этого варианта главной стадии разряда началось с восходящего разряда с вершины заземленного электрода, который тормозится в области, где электрическое поле в промежутке между искусственной грозовой ячейкой отрицательной полярности и заземленным стержневым электродом мини-



а)



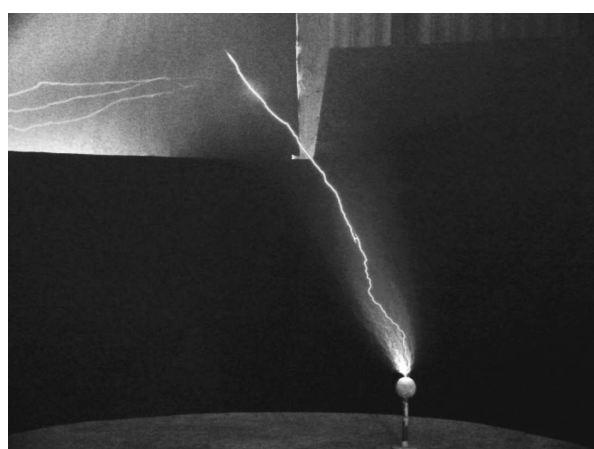
б)

Рис. 4. Вариант 2: фотография (а); покадровая развертка формирования главной стадии разряда (б) (размер кадра 75' 75 см, длительность кадра 3,5 мкс, межкадровая пауза 0,1 мкс)

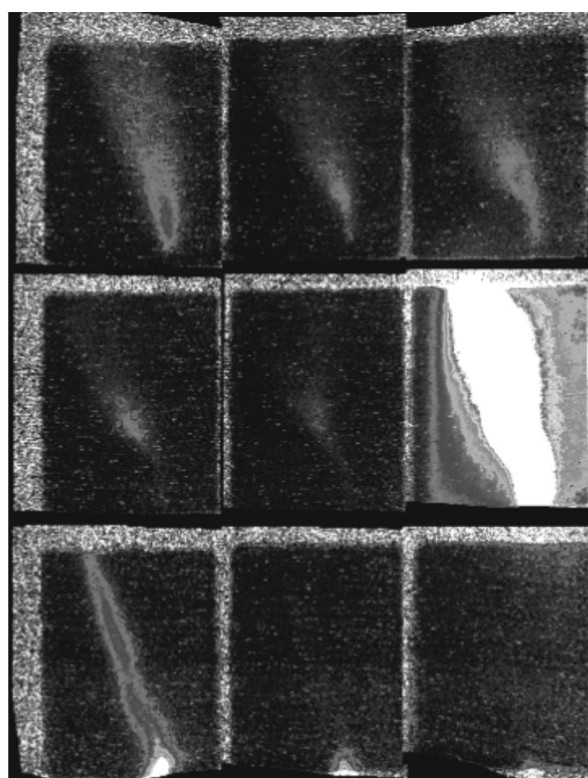
мально. Далее наблюдается развитие нисходящего разряда из заряженного аэрозольного облака, его взаимодействие с встречным восходящим разрядом и результирующее формирование главной стадии.

Вариант 3. Главная стадия, формирующаяся в результате взаимодействия нисходящего разряда из искусственной грозовой ячейки и встречного восходящего разряда с земли и характеризующаяся наличием радиальной стримерной короны с участка канала разряда.

Как видно на рис. 5,а, в отличие от *варианта 2* формирования главной стадии разряда наблюдается выраженная радиальная стримерная корона с участков канала разряда, находящихся в области



а)



б)

Рис. 5. Вариант 3: фотография (а); покадровая развертка формирования главной стадии разряда (б) (размер кадра 75' 75 см, длительность кадра 3,5 мкс, межкадровая пауза 0,1 мкс)

вблизи нижней границы искусственной грозовой ячейки. При этом взаимодействие нисходящего разряда из отрицательно заряженного облака и восходящего разряда с заземленного стержневого электрода происходит более интенсивно и приводит к формированию более мощной главной стадии разряда (рис. 5,б).

Вариант 4. Главная стадия, формирующаяся в результате развития нисходящего разряда из искусственного грозового облака и характеризующаяся отсутствием радиальной короны с канала разряда.

В этом случае стартовавший ранее с заземленного стержневого электрода восходящий лидерный разряд, попав в область относительно слабого электрического поля между заряженным облаком и землей, останавливается и в течение промежутка

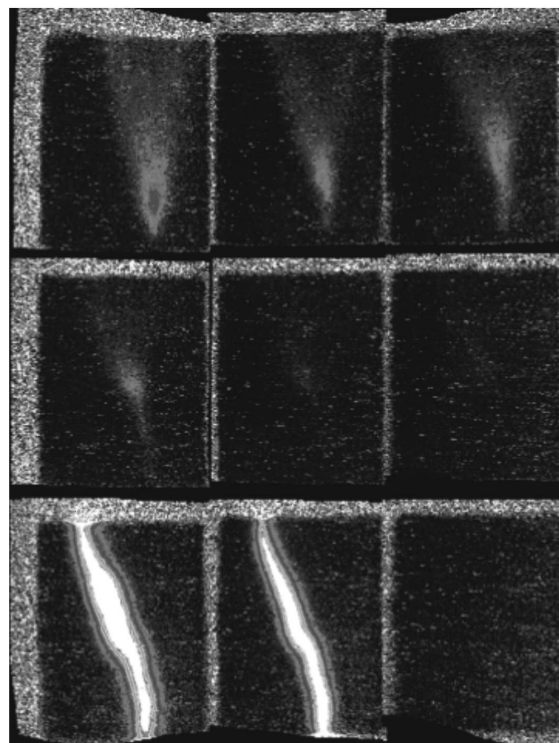
времени 4–8 мкс успевает фактически «угаснуть» (рис. 6,б). И главная стадия формируется в результате развития нисходящего разряда из искусственной грозовой ячейки отрицательной полярности, который может использовать участок канала существовавшего перед ним восходящего положительного лидера.

Вариант 5. Главная стадия, формирующаяся в результате развития нисходящего разряда из искусственного грозового облака и характеризующаяся наличием радиальной стримерной короны с участка канала разряда.

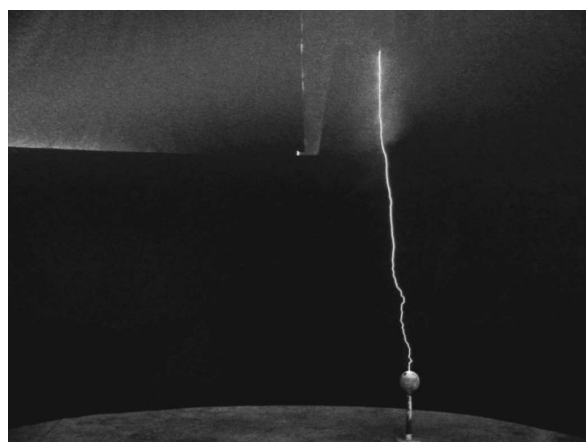
Здесь фактически отсутствует или слабо выражен восходящий разряд (рис. 7,б). При этом на-



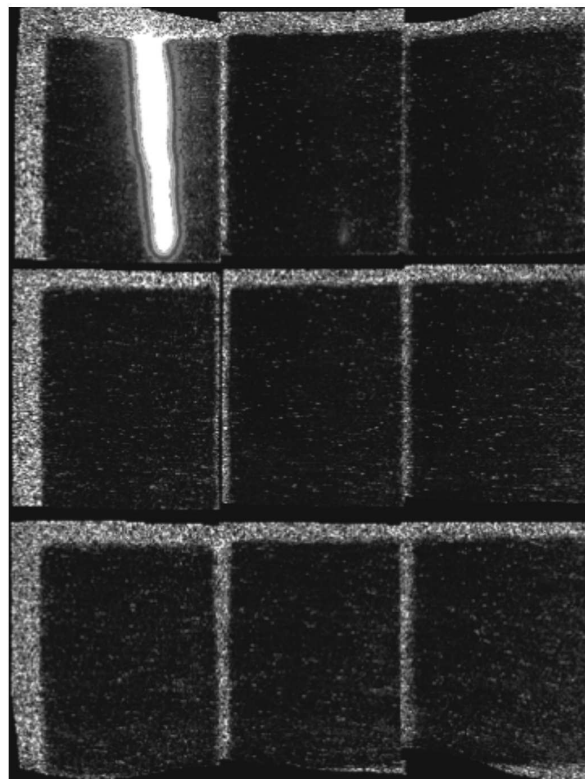
а)



б)



а)



б)

Рис. 6. Вариант 4: фотография (а); покадровая развертка формирования главной стадии разряда (б) (размер кадра 75×75 см, длительность кадра 3,5 мкс, межкадровая пауза 0,1 мкс)

Рис. 7. Вариант 5: фотография(а); покадровая развертка формирования главной стадии разряда (б) (размер кадра 75×75 см, длительность кадра 3,5 мкс, межкадровая пауза 0,1 мкс)

блюдается интенсивная радиальная стримерная корона с участков канала разряда, находящихся в области вблизи нижней границы искусственной грозовой ячейки (рис. 7,а).

Основные параметры импульса тока главной стадии разряда (средние значения, среднеквадратическое отклонение и диапазон) для каждого из классифицированных вариантов формирования главной стадии разряда между искусственным грозовым облаком и заземленным стержневым электродом сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры импульса тока главной стадии разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей

Вариант	$ I_p $, А	$a_{0,3}$, А/нс	$ Q_{sum} $, нКл
1	$31,13 \pm 23,23$ [11,20–107,52]	$3,44 \pm 10,26$ [0,16–49,62]	5355 ± 1644 [2384–8651]
2	$35,93 \pm 17,82$ [11,76–108,16]	$6,28 \pm 10,65$ [0,07–75,62]	5959 ± 1196 [2020–9184]
3	$62,58 \pm 23,98$ [16,64–144,64]	$11,38 \pm 18,03$ [0,17–88,56]	6917 ± 973 [4724–8765]
4	$64,17 \pm 21,24$ [24,32–88,32]	$19,65 \pm 16,61$ [0,24–47,53]	6356 ± 1290 [3281–9662]
Вариант 5	$85,68 \pm 29,54$ [35,84–144,80]	$29,77 \pm 26,08$ [0,87–72,38]	6824 ± 1431 [3706–8687]

Как видно из табл. 1, амплитудное значение импульса тока при формировании главной стадии разряда в результате взаимодействия восходящего и нисходящего разрядов (вариант 2) близко к значению амплитуды тока при восходящем разряде (вариант 1), но крутизна импульса тока почти в 2 раза больше. Возможно, что ускоренное нарастание тока на уровне 0,3–0,9 максимального значения обусловлено вкладом в общий импульс тока главной стадии именно подключением участка нисходящего разряда после начала взаимодействия восходящего и нисходящего лидеров. О существенном влиянии участка канала главного разряда, который формируется с участием нисходящего лидера, на характеристики импульса тока свидетельствует то, что при наличии радиальной стримерной короны с участка канала разряда, находящегося в области вблизи нижней границы искусственной грозовой ячейки (вариант 3), амплитуда тока и крутизна импульса тока главной стадии в среднем почти в 2 раза выше, чем при отсутствии какой-либо выраженной радиальной стримерной короны с участков канала разряда (вариант 2).

Более того, именно для вариантов 4 и 5 формирования главной стадии в результате развития нисходящего разряда, когда встречный разряд с электрода не успел развиваться, наблюдалась в среднем наибольшая крутизна импульса тока

(20–30 кА/мкс). Можно предположить, что это связано с особенностью формирования главной стадии разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей: при отсутствии восходящего или встречного лидера с земли более мощный нисходящий лидер проходит путь, сравнимый с длиной промежутка «облако–земля», и при достижении заземленного электрода быстрее нейтрализуется большим зарядом предшествовавшего нисходящего лидера и части грозовой ячейки. При встрече же нисходящего лидера из облака и восходящего лидера с заземленного электрода в формировании импульса тока главной стадии помимо участка нисходящего лидера участвует участок канала восходящего положительного лидера, который может достигать середины промежутка и несет относительно меньший заряд. В результате главная стадия разряда между заряженным облаком и землей в целом будет менее мощной.

При наличии радиальной стримерной короны с участков канала разряда, находящихся в области вблизи нижней границы искусственной грозовой ячейки (вариант 5), амплитуда и крутизна импульса тока в 1,25–1,35 раз больше, чем при отсутствии короны (вариант 4). Это связано скорее всего с тем, что наличие радиальной стримерной короны с участков канала, находящегося в области повышенной напряженности электрического поля вблизи нижней границы искусственной грозовой ячейки, будет обеспечивать дополнительный быстрый ввод заряда в канал главной стадии, повышая его проводимость и способствуя переносу большего заряда от искусственного грозового облака.

Можно предположить, что такие разные по условиям формирования варианты главной стадии разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей должны проявляться и в специфике создаваемого им электромагнитного излучения, регистрируемого широкополосными антеннами, и его спектра.

Основные спектральные характеристики электромагнитного излучения разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей, регистрируемого широкополосными антеннами А1–А3 для каждого из пяти вариантов формирования главной стадии разряда, полученные после обработки сигналов с применением вейвлет-анализа на временном промежутке, соответствующем импульсу тока главной стадии, приведены в табл. 2–4 (средние значения, среднеквадратическое отклонение и диапазон). Так как антенны А1 и А3 располагались на поверхности земли в ближней зоне (относительно длины канала разряда между искусственной грозовой ячейкой и заземленным электродом), то эффект рас-

пространения будет слабо влиять на спектральные характеристики регистрируемого электромагнитного излучения.

На основе анализа и обобщения полученных результатов можно выделить следующие специфические особенности спектральных характеристик электромагнитного излучения разряда между искусственным грозовым облаком и землей при различных вариантах формирования главной стадии.

Таблица 2

Спектральные характеристики электромагнитного излучения импульса тока главной стадии разряда, регистрируемого антенной А1

Вариант	f_{\max} , МГц	$f(C_{\max})$, МГц	C_{\max} , $\cdot 10^3$ A^2c^2
1	248,54 ± 433,31 [19,77–1725,76]	10,12 ± 11,47 [4,00–60,00]	3,81 ± 4,89 [0,46–17,71]
2	218,17 ± 264,23 [19,2–1609,81]	13,13 ± 16,28 [4,00–100,00]	10,36 ± 60,87 [0,20–1027,68]
3	132,24 ± 113,98 [19,85–501,9]	10,35 ± 11,50 [5,00–70,00]	14,89 ± 9,85 [1,15–50,46]
4	285,36 ± 233,39 [25,02–1046,54]	28,36 ± 27,22 [5,00–80,00]	22,78 ± 24,57 [1,91–82,85]
5	232,59 ± 240,12 [24,95–788,59]	11,50 ± 10,35 [6,00–0,00]	52,15 ± 64,74 [7,93–219,22]

Таблица 3

Спектральные характеристики электромагнитного излучения импульса тока главной стадии разряда, регистрируемого антенной А2

Вариант	f_{\max} , МГц	$f(C_{\max})$, МГц	C_{\max} , $\cdot 10^3$ A^2c^2
1	898,44 ± 501,24 [157,27–1975,61]	45,92 ± 78,86 [4,00–300,00]	2,57 ± 5,01 [0,01–17,71]
2	675,31 ± 505,48 [21,28–2500,00]	59,14 ± 55,69 [4,00–500,00]	2,90 ± 14,81 [0,01–236,59]
3	368,47 ± 238,60 [174,30–1583,49]	54,05 ± 23,46 [5,00–100,00]	2,50 ± 4,77 [0,03–31,44]
4	414,78 ± 226,97 [198,14–1046,54]	48,57 ± 3,50 [40,00–50,00]	7,98 ± 18,82 [0,05–73,94]
5	361,35 ± 180,55 [185,12–788,59]	53,00 ± 16,16 [40,00–100,00]	3,06 ± 2,64 [0,16–9,20]

Таблица 4

Спектральные характеристики электромагнитного излучения импульса тока главной стадии разряда, регистрируемого антенной А3

Вариант	f_{\max} , МГц	$f(C_{\max})$, МГц	C_{\max} , $\cdot 10^3$ A^2c^2
1	213,91 ± 367,24 [17,73–1154,16]	10,68 ± 11,96 [4,00–60,00]	3,66 ± 5,06 [0,16–17,71]
2	148,62 ± 266,98 [16,58–1338,11]	11,30 ± 10,16 [3,00–60,00]	7,70 ± 20,49 [0,09–236,59]
3	62,81 ± 106,79 [17,32–695,87]	9,14 ± 9,12 [4,00–50,00]	23,61 ± 57,64 [0,54–344,37]

4	172,61 ± 255,14 [17,75–1046,54]	14,93 ± 10,08 [4,00–40,00]	53,28 ± 100,88 [0,35–399,05]
5	135,50 ± 227,18 [17,49–788,59]	14,00 ± 13,75 [4,00–50,00]	52,84 ± 104,48 [1,66–346,79]

Наиболее высокие значения максимальной частоты f_{\max} в вейвлетном спектре наблюдались для сигналов, регистрируемых антенной А2, для всех вариантов формирования главной стадии: в большинстве случаев нижняя граница частотного диапазона выше 150 МГц. Но только для первого варианта формирования главной стадии разряда между заряженным облаком и землей в электромагнитном излучении, регистрируемом всеми тремя антеннами, наблюдались предельные значения частоты, превышающие 1000 МГц (рис. 8,а). Особенно это характерно для излучения, регистрируемого антенной А2, расположенной на высоте нижней границы искусственной грозовой ячейки. Предположительно наличие большой доли высоких частот связано с формированием множества стримеров с вершины канала восходящего разряда при его приближении к нижним границам облака из-за нарастания напряженности электрического поля в еще непотревоженном воздушном промежутке.

При других вариантах, когда в формировании главной стадии участвует нисходящий разряд, такие сверхвысокие значения частоты (более 1000 МГц) в спектре электромагнитного излучения присутствуют не для всех антенн или отсутствуют вовсе (рис. 8,б). В [2] тоже предполагалось, что столь высокие значения частоты (до 300 МГц), которые наблюдались при регистрации электромагнитного излучения природных молний «облако – земля» в ближней зоне, связаны с процессами первичного пробоя воздуха при формировании канала главной стадии разряда, а также с лидерными процессами, которые связаны с уже существующими участками канала разряда.

Для диапазонов частот $f(C_{\max})$, соответствующих максимальной интенсивности вейвлетного спектра электромагнитного излучения, регистрируемого антенной А2 практически при всех рассматриваемых вариантах формирования главной стадии разряда, выделяются три характерные частотные области: до 10 МГц (10% сигналов); от 30 до 60 МГц (70% сигналов); более 90 МГц (20% сигналов). Антенна А2 из-за своего расположения регистрирует в значительной мере электромагнитное излучение от разрядных явлений, которые происходят при формировании главной стадии разряда между искусственным грозовым облаком и землей ближе к границам облака, чем к земле.

Возможно, именно с этим связан факт, что в электромагнитном излучении главной стадии, фор-

мирующей в результате развития нисходящего разряда из искусственного грозового облака и характеризующейся отсутствием радиальной короны с канала разряда (вариант 4), отсутствует область частоты $f(C_{\max})$ свыше 90 МГц (рис. 9,б), которая наблюдается для всех остальных вариантов формирования главной стадии разряда.

В то же время необходимо отметить, что для главной стадии нисходящих разрядов в электромагнитном излучении, регистрируемом антенной А1, расположенной на поверхности земли вблизи стержневого электрода, характерно наличие области значений частоты, соответствующих максимальной интенсивности вейвлетного спектра в диапазоне 50–80 МГц (рис. 9). При этом значения $f(C_{\max})$ в среднем для электромагнитного излучения главной стадии нисходящего разряда (вариант 4) в

1,5–1,6 раза больше, чем для излучения встречных разрядов, которые формируются при взаимодействии восходящего и нисходящего лидеров (вариант 2), и в 1,7–1,9 раза больше, чем для восходящего разряда (вариант 1). В целом максимальная интенсивность вейвлетного спектра C_{\max} электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами А1 и А3, для нисходящих разрядов в 2,5–6,7 раз выше, чем для встречных разрядов, и в 10–15 раз выше, чем для восходящих.

Это свидетельствует о том, что такие сверхвысокие значения частоты в электромагнитном излучении главной стадии нисходящего разряда и их интенсивность могут быть связаны с электрофизическими процессами, которые проходят при формировании главного разряда в области вблизи заземленного электрода и обеспечивают высокую ско-

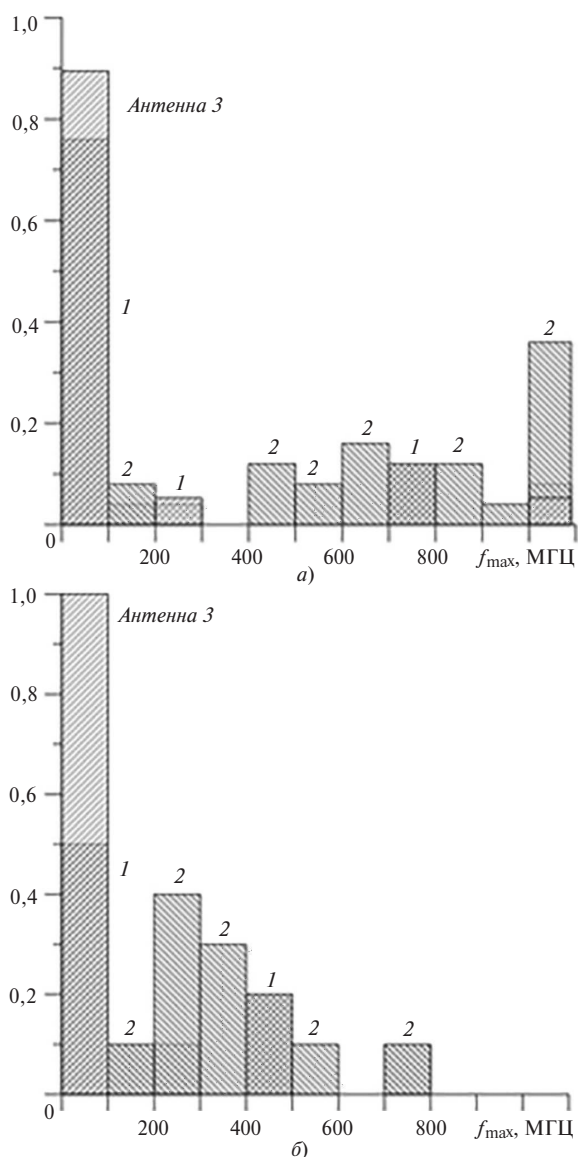


Рис. 8. Гистограмма максимальных значений частоты вейвлетного спектра электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами А1–А3 при вариантах 1 (а) и 5 (б) формирования главной стадии разряда

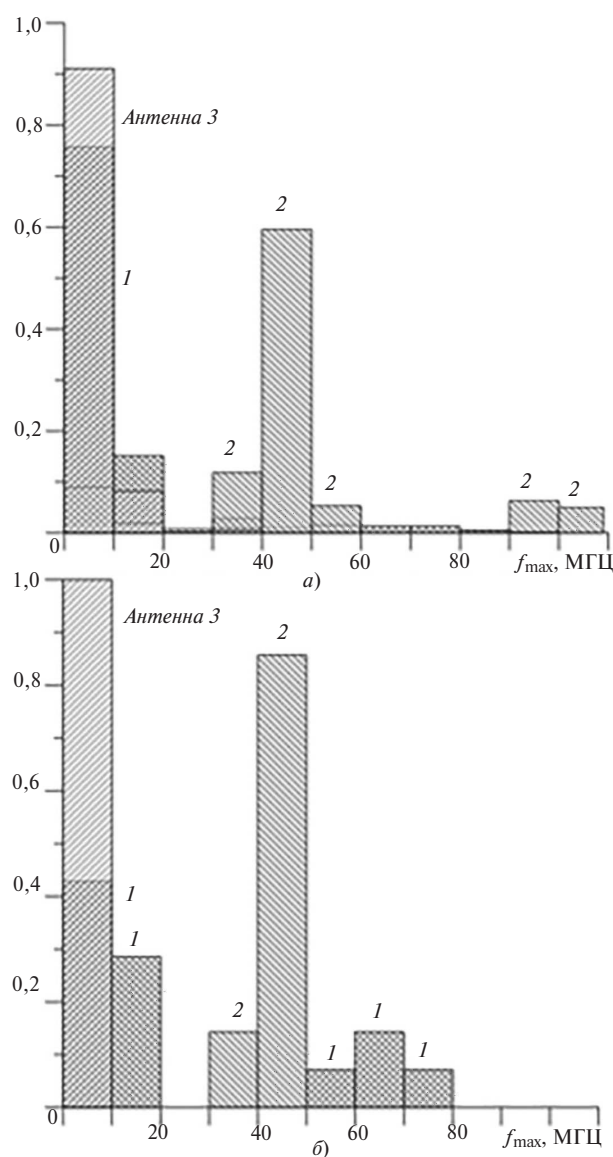


Рис. 9. Гистограмма значений частоты, соответствующих максимальной интенсивности вейвлетного спектра электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами А1–А3 при вариантах 2 (а) и 4 (б) формирования главной стадии разряда

рость нарастания тока. Для встречных разрядов, которые формируются при взаимодействии восходящего и нисходящего лидеров, на спектральные характеристики их электромагнитного излучения могут влиять процессы взаимодействия нисходящего и восходящего лидеров, запускающие процесс нейтрализации заряда и формирования сложной многопиковой структуры импульса тока главной стадии.

Другим фактором, существенно влияющим на спектральные характеристики главной стадии разряда между искусственным грозовым облаком и землей, является формирование радиальной стримерной короны с участков канала главного разряда (варианты 3 и 5). По сравнению с похожими вариантами формирования разряда между искусственной грозовой ячейкой и землей, но при отсутствии стримерной короны (варианты 2 и 4 соответственно), максимальная интенсивность вейвлетного спектра C_{\max} электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами А1 и А3, в среднем в несколько раз больше при относительно близких значениях диапазонов частоты $f(C_{\max})$, соответствующих максимальной интенсивности вейвлетного спектра электромагнитного излучения. Возможное влияние интенсивной радиальной короны с канала разряда на измеренную плоскими антеннами скорость изменения напряженности электрического поля dE/dt отмечено в [21], где регистрировались похожие биполярные импульсы сверхвысокой частоты.

Выводы. На основании проведенных экспериментальных исследований и анализа экспериментальных данных установлено пять вариантов формирования главной стадии разряда между искусственным грозовым облаком и землей, отличающихся электрофизическими механизмами формирования, параметрами импульса тока и спектральными характеристиками создаваемого ими электромагнитного излучения. Рассмотрены особенности характеристик импульсов тока и спектрального состава электромагнитного излучения от выделенных типов разрядов.

Для восходящих разрядов наблюдаются в среднем наименьшие значения амплитуды и крутизны импульса тока, но наибольшие предельные частоты в вейвлетном спектре — более 1000 МГц. Для встречных разрядов, которые формируются при взаимодействии восходящего и нисходящего лидеров, по сравнению с восходящими разрядами характерно увеличение в несколько раз крутизны импульса тока разряда, а также рост значений частоты, соответствующих максимальной интенсивности спектра (несколько десятков МГц), и самой макси-

мальной интенсивности вейвлетного спектра его электромагнитного излучения.

Для нисходящих разрядов характерны максимальные значения амплитуды и крутизны импульса тока главной стадии разряда и спектральных характеристик его электромагнитного излучения. Установлено, что для вариантов формирования главной стадии разряда, в которых присутствует радиальная стримерная корона с участков канала разряда, наблюдаются по сравнению с другими вариантами более высокие значения амплитуды и крутизны импульса тока разряда и характеристик вейвлетного спектра его электромагнитного излучения.

Таким образом, вариант формирования главной стадии разряда между заряженным облаком и землей (восходящий, встречный или нисходящий), а также наличие радиальной стримерной короны с канала разряда оказывает большое влияние на спектральный состав их электромагнитного излучения. То, что вейвлетный спектр электромагнитного излучения главного разряда между облаком и землей зависит от таких разных электрофизических процессов, делает перспективным более подробный анализ спектральных характеристик на более подробной временной шкале относительно импульса тока главной стадии разряда.

Необходимо отметить, что в вейвлетном спектре электромагнитного излучения разрядов между искусственным грозовым облаком и землей установлено присутствие частотных диапазонов в десятки и даже сотни МГц, которые, как сейчас считается, характерны для облачных разрядов молнии. Все это необходимо учитывать при выборе алгоритмов обработки и настройки параметров систем пеленгации молнии.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, государственное задание (проект № FSWF-2020-0019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cooray V. Lightning Electromagnetics. — IET Publishing, London, United Kingdom, 2012.
2. Nag A., Murphy M.J., Schulz W., Cummins K.L. Lightning location systems: insights on characteristics and validation technique. — Earth and Space Science 2 (2015), pp. 65–93.
3. Rakov V.A. A review of recent progress in studying physics of lightning. — Proc. of 7th All-Russian Conf. on Atmospheric Electricity, St. Petersburg, Russia, 2012.
4. Lightning: Principles, Instruments and Applications. Review of Modern Lightning Research. Eds.: H.D. Betz, U. Schumann, P. Laroche. Springer, 2009.
5. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001, 320 с.
6. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: physics and effects. Cambridge University Press, 2003, 687 p.
7. Dong W., Liu H. Observation of compact intracloud discharges using VHF broadband interferometer.—Proc. of 31st Intern. Conf. on Lightning Protection, Vienna, Austria, 2012.

8. Takayanagi Y., Akita M., Nakamura Y., Yoshida S., Morimoto T., Ushio T., Kawasaki Z. Leader process in 3D observed by VLF/LF broadband interferometer. — Proc. of 31st Intern. Conf. on Lightning Protection, Vienna, Austria, 2012.

9. Rakov V.A. Electromagnetic Methods of Lightning Detection, Surveys in Geophysics (Springer), vol. 34, No. 4, July 2013, DOI 10.1004/s10712-013-9251-1.

10. **Руководство** по метеорологическим приборам и методам наблюдений. Всемирная метеорологическая организация. ВМО-№8 (перевод. издание), Женева, Швейцария, 2017.

11. Makela J. Electromagnetic signatures of lightning near the HF frequency band. — Helsinki, Finnish Meteorological institute, 2009.

12. Chen M., Du Y., Burnett J., Dong W. The electromagnetic radiation from lightning in the interval of 10 kHz to 100 MHz. — Proc. of 12th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Versailles, France, 2003.

13. Temnikov A.G., Orlov A.V., Bolotov V.N., Tkach Y.V. Studies of the parameters of a spark discharge between an artificial charged water-aerosol cloud and the ground. — Technical Physics, 2005, vol. 50 (7), pp. 868–875.

14. Maslowski G., Baramski P., Michnowski S. Analysis of electric field spectrograms of lightning discharge components. — Proc. of Intern. Symp. on Lightning Physics and Effects, Vienna, Austria, 2007.

15. Sharma S.R., Cooray V., Fernando M., Miranda F.J. Temporal features of different lightning events revealed from wavelet transform. — Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2011, No. 73, pp. 507–515.

16. Esa M.R.M., Ahmad M.R., Cooray V. Wavelet analysis of the first electric field pulse of lightning flashes in Sweden. — Journal of Atmospheric Research, 2014, No. 138, pp. 253–267.

17. Белова О.С., Темников А.Г., Черненский Л.Л. Исследование спектральных характеристик разряда из искусственного облака заряженного водного аэрозоля. — Энергетик, 2013, № 10, с. 42–43.

18. Temnikov A.G., Chernensky L.L., Belova O.S., Orlov A.V., Zimin A.S. Spectral characteristics of discharges from artificial

charged aerosol cloud. — IEEE of 2014 Intern. Conf. on Lightning Protection (ICLP 2014). Article number 6973333.

19. Темников А.Г., Орлов А.В., Черненский Л.Л., Белова О.С., Герастенок Т.К., Зимин А.С. Исследование систем определения места удара и параметров разряда молнии с использованием искусственного грозового облака. — Вестник МЭИ, 2015, № 6, с. 35–44.

20. Витязев В.В. Вейвлет — анализ временных рядов. Учебное пос. Изд-во С. Петербургского университета, 2001, 61 с.

21. Tran M.D., Rakov V.A., Mallick S. An unusual two-stroke negative cloud-to-ground flash showing profuse branching and corona-like formations. — Proc. of 2014 Intern. Conf. on Lightning Protection (ICLP 2014), Shanghai, China, pp. 1272–1281.

[14.02.2020]

А в т о р ы: Белова Ольга Сергеевна — младший научный сотрудник кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» (ТЭВН) НИУ «МЭИ».

Темников Александр Георгиевич — кандидат техн. наук, доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 1994 г.

Черненский Леонид Леонидович — кандидат техн. наук, доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2011 г.

Орлов Александр Васильевич — кандидат техн. наук, доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 1991 г.

Лысов Николай Юрьевич — старший преподаватель кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

Кившар Татьяна Константиновна — младший научный сотрудник кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

Журавкова Дарья Сергеевна — аспирант кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ»

Electrichestvo, 2020, No. 5, pp. 34–44

DOI:10.24160/0013-5380-2020-5-34-44

Studying the Spectral Characteristics of Electromagnetic Radiation Produced by Discharge between an Artificial Thundercloud and Ground

BELOVA Ol'ga S. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» — NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Junior Scientist of High-Voltage Engineering and Electrophysics (HVEE) Dept.

TEMNIKOV Alexander G. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor of HVEE Dept., Cand. Sci. (Eng.)

CHERNENSKY Leonid L. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor of HVEE Dept., Cand. Sci. (Eng.)

ORLOV Alexander V. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Associate Professor of HVEE Dept., Cand. Sci. (Eng.)

LYSOV Nikolay Yu. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Senior Teacher of HVEE Dept.

KIVSHAR Tat'yana K. (NEU «MPEI», Moscow, Russia) — Junior Scientist of HVEE Dept.

ZHURAVKOVA Dar'ya S. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) — Graduate Student of HVEE Dept.

The results from experiments on studying the electromagnetic radiation produced by discharges between an artificial thundercloud and ground are presented. Five possible versions in which the main stage of discharge between an artificial thundercloud and ground evolves are revealed: upward flash, counter and downward flashes, including those with a radial streamer corona from the discharge channel. It has been found that the main stage versions of the discharge between an artificial thundercloud and ground that

differ from one another in their formation conditions can manifest themselves also in the specific features of the electromagnetic radiation produced by the discharge (which is recorded by wide-band aeri-als) and its spectrum. A wavelet analysis was carried out, which made it possible to determine the specific features pertinent to the spectral characteristics of the electromagnetic radiation produced by the identified discharge versions and the current impulse parameters at the discharge main stage. It has been found that relatively small values of the current impulse amplitude and steepness are typical for upward flashes, which on the other hand are characterized by ultrahigh limit frequencies in their electromagnetic radiation wavelet spectrum. The highest electromagnetic radiation wavelet spectrum intensity is observed for downward flashes. It has been found that the radial streamer corona from the discharge channel parts and/or the interaction between the upward and downward leaders may lead to higher values of the discharge current impulse amplitude and steepness, and to higher characteristics of the discharge electromagnetic radiation wavelet spectrum. It is pointed out that the presence of frequency bands with a width from tens to hundreds of MHz in the electromagnetic radiation wavelet spectrum of discharges between an artificial thundercloud and ground should be taken into account in the design and operation of lightning direction finding systems.

Key words: lightning, artificial thundercloud, discharges, electromagnetic radiation, wide-band aeri-als, wavelet analysis, spectral characteristics

REFERENCES

1. **Cooray V.** Lightning Electromagnetics. – IET Publishing, London, United Kingdom, 2012.
2. **Nag A., Murphy M.J., Schulz W., Cummins K.L.** Lightning location systems: insights on characteristics and validation technique. – Earth and Space Science 2 (2015), pp. 65–93.
3. **Rakov V.A.** A review of recent progress in studying physics of lightning. – Proc. of 7th All-Russian Conf. on Atmospheric Electricity, St. Petersburg, Russia, 2012.
4. **Lightning: Principles, Instruments and Applications.** Review of Modern Lightning Research /. Eds.: H.D. Betz, U. Schumann, P. Laroche. Springer, 2009.
5. 2001, 320 c.
6. **Rakov V.A., Uman M.A.** Lightning: physics and effects. Cambridge University Press, 2003, 687 p.
7. **Dong W., Liu H.** Observation of compact intracloud discharges using VHF broadband interferometer.–Proc. of 31st Intern. Conf. on Lightning Protection, Vienna, Austria, 2012.
8. **Takayanagi Y., Akita M., Nakamura Y., Yoshida S., Morimoto T., Ushio T., Kawasaki Z.** Leader process in 3D observed by VLF/LF broadband interferometer. – Proc. of 31st Intern. Conf. on Lightning Protection, Vienna, Austria, 2012.
9. **Rakov V.A.** Electromagnetic Methods of Lightning Detection, Surveys in Geophysics (Springer), vol. 34, No. 4, July 2013, DOI 10.1004/s10712-013-9251-1.
10. **Rukovodstvo po meteorologicheskim priboram i metodam nablyudeniya.** Vsemirnaya meteorologicheskaya organizatsiya. VMO-№8 (perevod. izdaniye) (Guide to meteorological instruments and methods of observation. World Meteorological Organization. WMO-No. 8 (transl. edition)), Geneva, Switzerland, 2017.
11. **Makela J.** Electromagnetic signatures of lightning near the HF frequency band. – Helsinki, Finnish Meteorological institute, 2009.
12. **Chen M., Du Y., Burnett J., Dong W.** The electromagnetic radiation from lightning in the interval of 10 kHz to 100 MHz. – Proc. of 12th Intern. Conf. on Atmospheric Electricity, Versailles, France, 2003.
13. **Temnikov A.G., Orlov A.V., Bolotov V.N., Tkach Y.V.** Studies of the parameters of a spark discharge between an artificial charged water-aerosol cloud and the ground. – Technical Physics, 2005, vol. 50 (7), pp. 868–875.
14. **Maslowski G., Baramski P., Michnowski S.** Analysis of electric field spectrograms of lightning discharge components. – Proc. of Intern. Symp. on Lightning Physics and Effects, Vienna, Austria, 2007.
15. **Sharma S.R., Cooray V., Fernando M., Miranda F.J.** Temporal features of different lightning events revealed from wavelet transform. – Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2011, No. 73, pp. 507–515.
16. **Esa M.R.M., Ahmad M.R., Cooray V.** Wavelet analysis of the first electric field pulse of lightning flashes in Sweden. – Journal of Atmospheric Research, 2014, No. 138, pp. 253–267.
17. **Belova O.S., Temnikov A.G., Chernenskiy L.L.** *Energetik – in Russ. (Power Engineer)*, No.10, 2013, pp. 42–43.
18. **Temnikov A.G., Chernenskiy L.L., Belova O.S., Orlov A.V., Zimin A.S.** Spectral characteristics of discharges from artificial charged aerosol cloud. – IEEE of 2014 Intern. Conf. on Lightning Protection (ICLP 2014). Article number 6973333.
19. **Temnikov A.G., Orlov A.V., Chernenskiy L.L., Belova O.S., Gerastenok T.K., Zimin A.S.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of Moscow Power Engineering Institute)*, 2015, No. 6, pp. 35–44.
20. **Vityazev V.V.** *Veyvlet – analiz vremennykh ryadov. Uchebnoye pos. (Wavelet – Time Series Analysis. Educational village)* Uchebnoye pos. Izd-vo S. Peterburgskogo universiteta, 2001, 61 p.
21. **Tran M.D., Rakov V.A., Mallick S.** An unusual two-stroke negative cloud-to-ground flash showing profuse branching and corona-like formations. – Proc. of 2014 Intern. Conf. on Lightning Protection (ICLP 2014), Shanghai, China, pp. 1272–1281.

[14.02.2020]