

УДК 621.311

**ОСОБЕННОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ МОЛНИИ
“ОБЛАКО–ЗЕМЛЯ” И СТИМУЛИРОВАНИЯ РАЗРЯДКИ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА
ГРУППАМИ МОДЕЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ****© 2019 г. А. Г. Темников¹, *, **, Л. Л. Черненский¹, А. В. Орлов¹, Н. Ю. Лысов¹,
О. С. Белова¹, Т. К. Кившар¹, Д. С. Журавкова¹**¹*Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Москва, Россия***e-mail: TemnikovAG@mpei.ru****e-mail: a_g_temnikov@mail.ru*

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 16.04.2019 г.

В статье представлены обобщенные результаты проверки основных положений научных и инженерных способов искусственного инициирования в грозовых облаках молнии “облако–земля” группами модельных гидрометеоров с учетом мелкомасштабной зарядовой структуры грозового облака на основе экспериментальных исследований с использованием систем униполярных искусственных грозовых ячеек. Выявлены возможные специфические особенности применения групп модельных гидрометеоров для искусственного инициирования молнии и стимулирования разрядки грозового облака, имеющего локальные области с повышенной плотностью объемного заряда. Установлено, что с увеличением количества групп модельных гидрометеоров, вводимых в грозовые ячейки, растет вероятность и частота развития канальных разрядов между облаком и землей с участием гидрометеоров. При этом в несколько раз возрастает степень разрядки облака, по сравнению со случаем применения одиночной группы гидрометеоров – в 3–4 раза возрастала величина нейтрализованного заряда облака и в два раза амплитуда тока главной стадии разряда. Выявлено влияние расстояния между группами модельных гидрометеоров на вероятность и интенсивность разрядных процессов. Показано, что при увеличении расстояния между группами растет вероятность и интенсивность канальных разрядов в землю из отрицательно заряженных ячеек. При положительной полярности грозовых ячеек рост вероятности инициирования и распространения канальных разрядов наблюдается, когда расстояние между группами гидрометеоров становится меньше продольных размеров группы. В зависимости от полярности грозовых ячеек, экспериментально установлено влияние способа соединения нескольких групп модельных гидрометеоров на вероятность формирования разряда между ячейками и землей и разрядки облаков. При отрицательной полярности грозовых ячеек объединение двух групп диэлектрической леской относительно слабо влияло на вероятность и интенсивность инициирования и стимулирование канальных разрядов между искусственными грозовыми ячейками и землей. При положительной полярности искусственных грозовых ячеек объединение групп диэлектрической леской в несколько раз увеличило вероятность участия нескольких групп гидрометеоров в развитии разряда между грозовыми ячейками и землей, при этом выросла и величина нейтрализованного заряда облака.

Ключевые слова: искусственная грозовая ячейка положительной и отрицательной полярности, грозовое облако, искусственное инициирование молнии, особенности, экспериментальное исследование, группа модельных гидрометеоров, канальный разряд, форма гидрометеоров

DOI: 10.1134/S0002331019020134

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при крупномасштабном вертикальном рассмотрении грозового облака обычно используется четырех зарядовая структура: в нижней части относительно небольшой положительный заряд, выше — основной отрицательный заряд, еще выше — основной положительный заряд, в верхней части снова отрицательный заряд [1–3]. В то же время при разработке способов искусственного инициирования молнии в грозовом облаке массивами модельных гидрометеоров необходимо учитывать следующие моменты. Во-первых, указанная выше зарядовая структура грозового облака является одним из наиболее часто встречающихся вариантов на определенной стадии существования грозового облака [4]. На других этапах его жизни из-за специфики процессов электризации, а также направления и скорости воздушных потоков, зарядовая структура грозового облака может существенно изменяться вплоть до того, что основной отрицательный заряд может сформироваться в нижней части облака [5–7]. Во-вторых, сами области основного отрицательного заряда в грозовом облаке могут состоять из более мелкомасштабных зарядовых структур с повышенной плотностью объемного заряда, имеющих размеры несколько десятков–сотен метров и называемых в советской и российской терминологии грозовыми ячейками [8–10]. Про внутреннюю мелкомасштабную зарядовую структуру области основного положительного заряда в грозовом облаке известно гораздо меньше, но можно предположить, что она тоже состоит из нескольких грозовых ячеек положительной полярности. Таким образом, при разработке научных и инженерных способов искусственного инициирования молнии в грозовых облаках группами модельных гидрометеоров необходимо принимать во внимание мелкомасштабную зарядовую структуру основных зарядовых центров облака. Экспериментальные исследования с использованием системы униполярных искусственных грозовых ячеек [11–13] позволили выявить возможные специфические особенности применения групп модельных гидрометеоров для искусственного инициирования молнии и стимулирования разрядки грозового облака, имеющие локальные области с повышенной плотностью объемного заряда.

ОСОБЕННОСТИ СПОСОБОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ
МОЛНИИ И РАЗРЯДКИ ГРОЗОВОГО ОБЛАКА ГРУППАМИ
МОДЕЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ

Разработанные ранее основные положения научных и инженерных способов искусственного инициирования внутриоблачной молнии в грозовых облаках и молнии “облако–земля” группами модельных гидрометеоров (ГМ) предполагают [14], что с точки зрения эффективности искусственного инициирования молнии группами модельных гидрометеоров последние можно разбить на пять классов, исходя из коэффициентов усиления электрического поля K_{yc} . Ожидается [14], что группы модельных гидрометеоров класса 2 (K2) ($K_{yc} = 5–9$, поперечные размеры ГМ не намного меньше продольных) и класса 3 (K3) ($K_{yc} = 10–19$, продольные размеры модельных ГМ в 3–5 раз больше поперечных) сантиметрового диапазона размеров, объединяемые диэлектрической леской или диэлектрической лентой, в зависимости от мест их введения в электрически активные (грозовые) облака могут обеспечить наиболее оптимальные условия для инициирования отрицательной или положительной молнии типа “облако–земля” и целенаправленной разрядки грозового облака.

Для проверки разработанных основных положений и оптимальных вариантов способа искусственного инициирования молнии “облако–земля” группами модельных ГМ указанных выше классов (K2 и K3) были выполнены комплексные экспериментальные исследования с использованием систем униполярных искусственных грозовых ячеек. На основе анализа и обобщения полученного банка экспериментальных данных по влиянию модельных гидрометеоров на инициирование и распространение

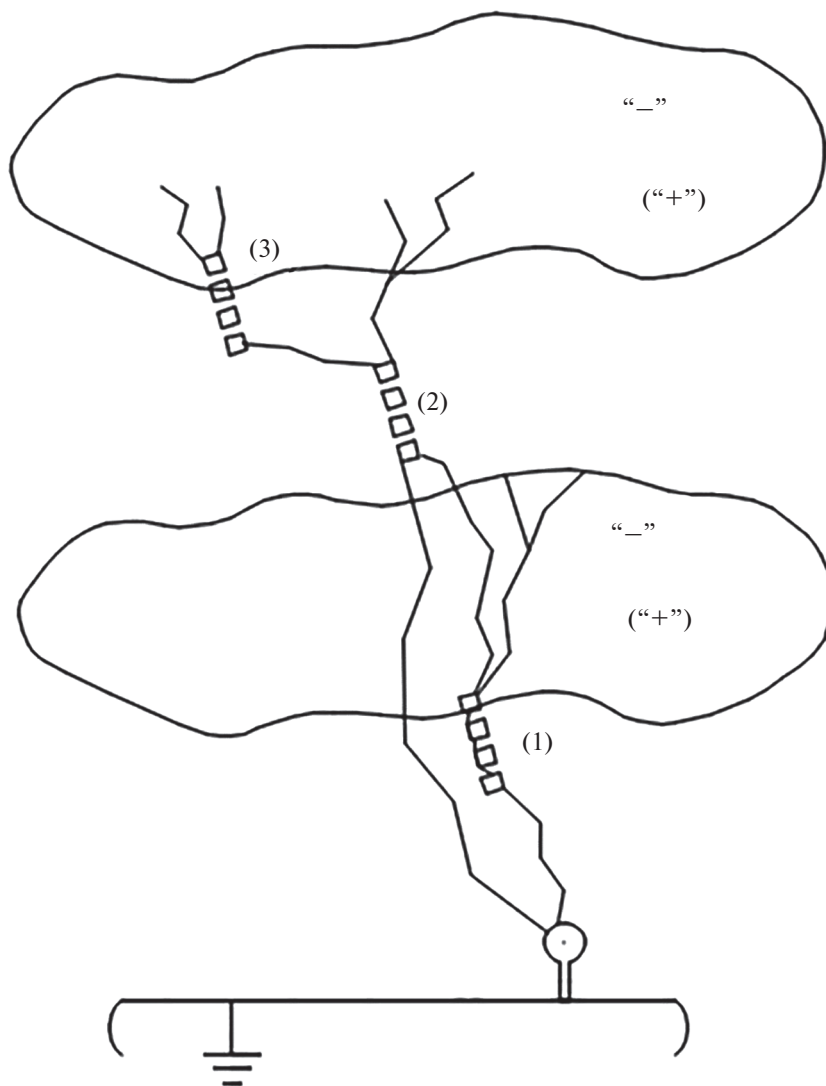


Рис. 1. Варианты введения нескольких групп модельных гидрометеоров (1)–(3) в основную отрицательный или положительный заряд грозового облака, имеющего многоячеистую структуру.

разряда между искусственными грозовыми ячейками отрицательной или положительной полярности и землей выявлены возможные особенности способов искусственного инициирования молнии “облако–земля” и стимулирования разрядки грозового облака группами модельных ГМ.

1. Установлено, что для искусственного инициирования молнии из грозовых облаков, имеющих многоячеистую зарядовую структуру, перспективным будет одновременное введение в них нескольких групп модельных гидрометеоров (рис. 1). Количество применяемых групп и места их введения в грозовое облако могут варьироваться в зависимости от характеристик и расположения соседних грозовых ячеек в пределах



Рис. 2. Формирование канальных разрядов между системой отрицательно заряженных искусственных грозовых ячеек и землей с участием нескольких групп модельных гидрометеоров.

областей основных униполярных зарядов облака: вблизи нижней границы нижней ячейки, в пространстве между ячейками, в границах самих ячеек. Как показали экспериментальные исследования с использованием искусственных грозовых ячеек и анализ данных наблюдений за процессами инициирования природной молнии [5, 9, 14–16], наиболее перспективными областями в грозовом облаке для введения групп модельных ГМ при искусственном инициировании молнии “облако–земля” и стимулировании его разрядки являются следующие (рис. 1): область (1) – у нижней границы нижнего облака; область (2) – в пространстве между нижним и верхним облаками; область (3) – у нижней границы верхнего облака.

Экспериментальные исследования с использованием искусственных грозовых ячеек показали, что вероятность инициирования или стимулирования развития модельными ГМ канальных разрядов между системой грозовых ячеек и землей (P_{Σ}), складывается из вероятности инициирования разряда отдельными группами модельных гидрометеоров из всей совокупности вводимых в облако групп ($P_{1ГМ}$) и вероятности участия в этих процессах практически одновременно всех вводимых в облако групп модельных гидрометеоров ($P_{2ГМ}$) (рис. 2).

Таблица 1. Инициирование и стимулирование канальных между униполярными искусственными грозowymi ячейками и землей группами модельных гидрометеоров различного класса

Варианты введения групп модельных гидрометеоров	Полярность ячеек	Вероятность P и интенсивность T формирования канальных разрядов с участием групп ГМ				
		P_{Σ} , о.е.	$P_{1ГМ}$, о.е.	$T_{1ГМ}$, с	$P_{2ГМ}$, о.е.	$T_{2ГМ}$, с
K2(1)	отриц.	0.802	0.802	3.19	—	—
K2(2)	отриц.	0.740	0.740	5.71	—	—
K3(1) + K2(2)	отриц.	0.867	0.200	10.37	0.667	4.06
K3(1) + K2(2) + K2(3)	отриц.	1.000	0.625	3.53	0.375	15.4

Доля экспериментальных подходов, когда наблюдалось влияние числа и места расположения групп модельных гидрометеоров на инициирование и стимулирование распространения искровых (канальных) разрядов между униполярными искусственными грозowymi ячейками и землей, приведена в табл. 1 для следующих возможных вариантов введения групп гидрометеоров в систему из нескольких отрицательно заряженных грозowych ячеек: K2(1) – одиночная группа гидрометеоров (ГМ класса 2) вводится вблизи нижней границы нижней ячейки; K2(2) – одиночная группа гидрометеоров (ГМ класса 2) вводится в пространство между нижней и верхней ячейками; K3(1) + K2(2) – две группы гидрометеоров одновременно вводятся вблизи нижней границы нижней ячейки (ГМ класса 3) и в пространство между нижней и верхней ячейками (ГМ класса 2); K3(1) + K2(2) + K2(3) – три группы гидрометеоров одновременно вводятся в пространство вблизи нижней границы нижней ячейки (ГМ класса 3), между нижней и верхней ячейками (ГМ класса 2) и вблизи нижней границы верхней ячейки (ГМ класса 2).

В табл. 1 также представлены данные по интенсивности формирования канальных разрядов между униполярными искусственными грозowymi ячейками и землей группами модельных гидрометеоров T – времени воздействия искусственных грозowych ячеек, в среднем требуемого для инициирования или стимулирования отдельными группами модельных гидрометеоров ($T_{1ГМ}$) или всеми группами модельных гидрометеоров ($T_{2ГМ}$) одного канального разряда между облаками и землей.

С увеличением количества групп модельных гидрометеоров, вводимых в грозовые ячейки, вероятность их участия в инициировании и стимулировании распространения канальных разрядов между облаком и землей, в том числе с подключением верхней грозовой ячейки, росла. Уже при введении трех групп модельных ГМ от одной до трех групп всегда участвовали в формировании канального разряда между отрицательно заряженными ячейками и землей. При этом росла и частота формирования канальных разрядов между системой грозowych ячеек и землей с участием одной или нескольких групп модельных гидрометеоров различного класса (временной интервал между последовательно иницируемые с участием модельных гидрометеоров канальными разрядами уменьшался до нескольких секунд).

Введение в грозовые ячейки одновременно нескольких групп модельных ГМ может существенно увеличить степень разрядки грозового облака при инициировании ими молнии типа “облако–земля”. Эксперименты с использованием искусственных грозowych ячеек показали, что введение двух-трех групп ГМ увеличивало степень разрядки системы заряженных облаков в несколько раз по сравнению со случаем применения одиночной группы ГМ (рис. 3). При общем заряде системы отрицательных ячеек в 200–250 мкКл, при разряде, иницированном двумя-тремя группами модельных ГМ, величина нейтрализованного заряда, в среднем, составляла 39–41 мкКл. При введе-

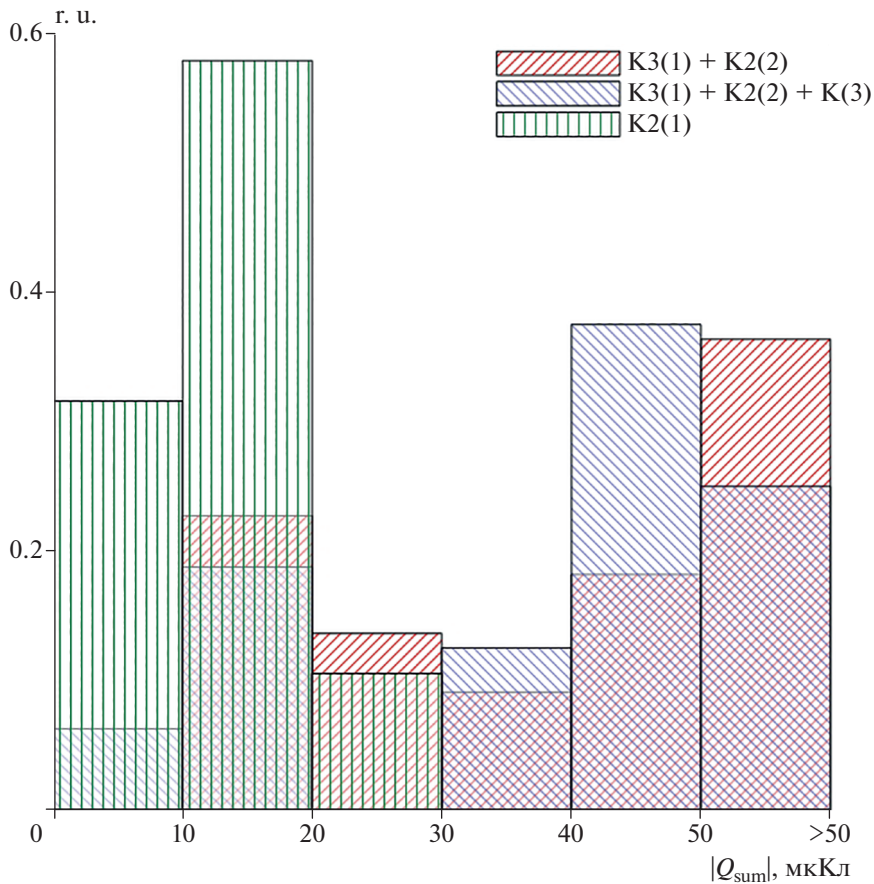


Рис. 3. Распределение значений заряда облака, нейтрализованного разрядом между отрицательно заряженными ячейками и землей с участием групп ГМ.

нии в заряженные ячейки одиночной группы ГМ величина нейтрализованного заряда, в среднем, не превышала 12–14 мкКл.

Аналогичная тенденция установлена для значений амплитуды импульса тока главной стадии разряда, инициированного модельными гидрометеорами (рис. 4). При введении одиночной группы ГМ, амплитуда импульса тока, в среднем, составляла 40–50 А. При использовании нескольких групп модельных ГМ средние значения максимума тока возрастали в несколько раз, составляя 100–110 А.

Экспериментальные исследования показали, что при введении одиночной группы модельных ГМ класса К2 в систему униполярных грозовых ячеек отрицательной полярности, степень разрядки облаков существенно зависит и от места введения группы ГМ. При введении группы ГМ в область между двумя заряженными облаками (область 2 на рис. 1) степень разрядки облаков увеличивается в несколько раз, по сравнению со случаем, когда группу ГМ вводили у нижних границ нижнего облака (область 1 на рис. 1). Хотя вероятность инициирования разряда “облако–земля” при варианте К2(2), введения в систему грозовых ячеек группы модельных ГМ ниже, чем для варианта К2(1) (табл. 1), во время главной стадии разряда между облаком и землей, иници-

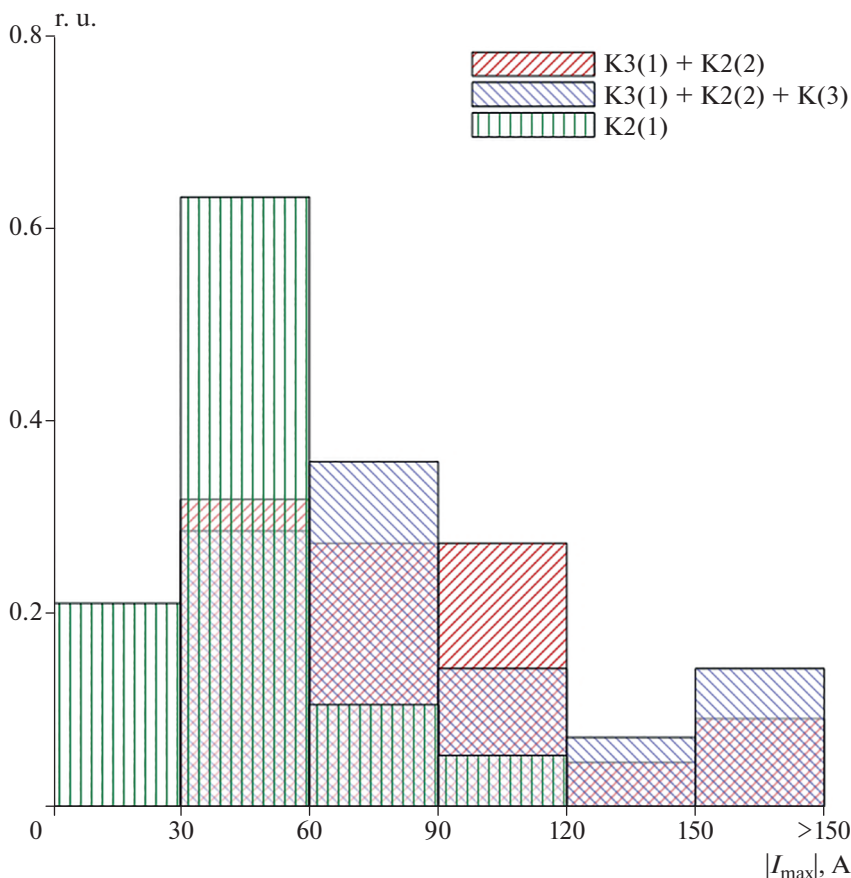


Рис. 4. Распределение значений амплитуды тока главной стадии разряда, инициированного группами ГМ между отрицательно заряженными ячейками и землей.

ированном группой ГМ при варианте введения группы ГМ K2(2), нейтрализуется в среднем в 4 раза больший облачный заряд и амплитуда импульса тока главного разряда в 2 раза больше, чем при варианте введения группы ГМ K2(1) (табл. 2).

Данный эффект увеличения степени разрядки облаков, скорее всего, связан с тем, что при инициировании разряда в землю группой модельных ГМ, помещенных у нижней границы нижнего облака в разрядных процессах участвует только нижняя грозовая ячейка, в результате формируется одноударная стадия главного разряда (рис. 5).

Таблица 2. Влияние места введения одиночной группы модельных ГМ класса K2 в систему униполярных грозовых ячеек отрицательной полярности на параметры разрядки униполярных грозовых ячеек

Зона введения группы ГМ	Нейтрализованный облачный заряд $ Q_{sum} $, мкКл	Амплитуда тока главной стадии разряда $ I_{max} $, А
K2(1)	12.97 ± 3.54	43.32 ± 10.72
K2(2)	42.78 ± 12.50	90.54 ± 24.99

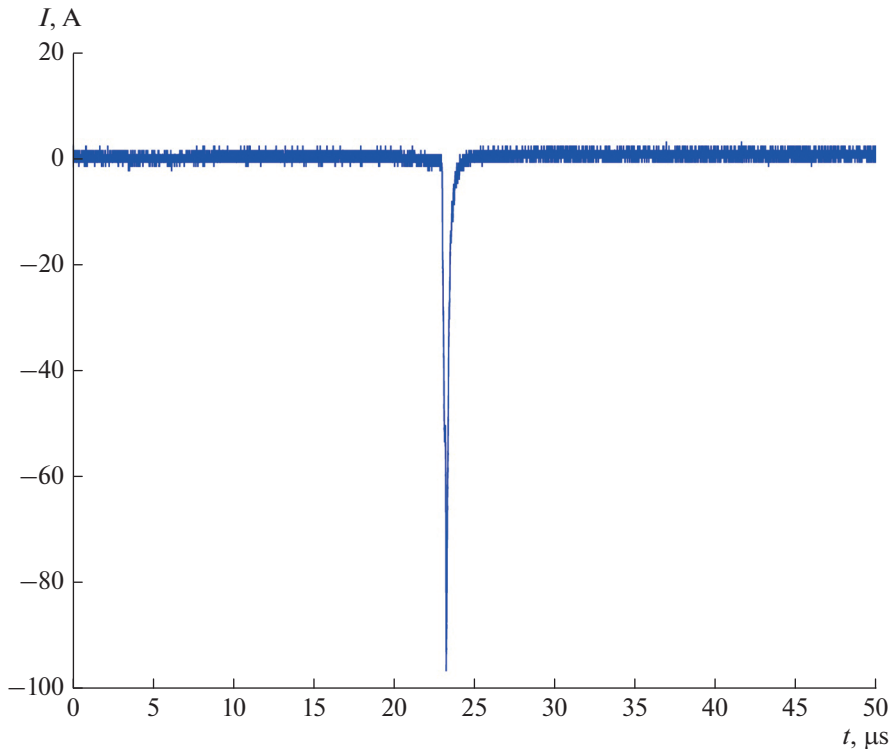


Рис. 5. Осциллограмма тока главной стадии разряда, при одноударном разряде из системы искусственных грозовых ячеек отрицательной полярности с участием группы модельных ГМ класса К2, расположенных в зоне 1.

В большинстве случаев, когда группа модельных ГМ помещается между двумя облаками, после прохождения первого главного разряда к нему подключается и верхняя грозовая ячейка, формируя через несколько десятков микросекунд мощный повторный разряд, в результате общая величина нейтрализуемого облачного заряда существенно возрастает (рис. 6).

2. Установлено, что для искусственного инициирования молнии из грозовых облаков, имеющих многоячеистую зарядовую структуру, при одновременном введении в них нескольких групп модельных гидрометеоров существенную роль играют как величина расстояния между соседними группами модельных ГМ, так и класс группы ГМ, которая размещается вблизи нижней границы нижнего облака (табл. 3).

Интересно выделить то, что, при увеличении расстояния L_{12} между группами модельных гидрометеоров одного класса или разных классов в пределах одного-двух линейных размеров отдельных групп ГМ, наблюдается уменьшение вероятности $P_{1ГМ}$ инициирования и стимулирования канальных разрядов в сторону земли отдельной (нижней или верхней) группой модельных гидрометеоров из пары вводимых в отрицательно заряженные облака групп (при увеличении расстояния в 1.5–2.5 раза снижение вероятности в 1.3–2.0 раза). В то же время растет $P_{2ГМ}$ инициирования и стимулирования распространения канальных разрядов из грозовых ячеек одновременно обеими группами модельных ГМ, вводимыми в облако (в 1.2–2.0 раза). Для системы положительно заряженных грозовых ячеек все эти зависимости являются гораздо менее выра-

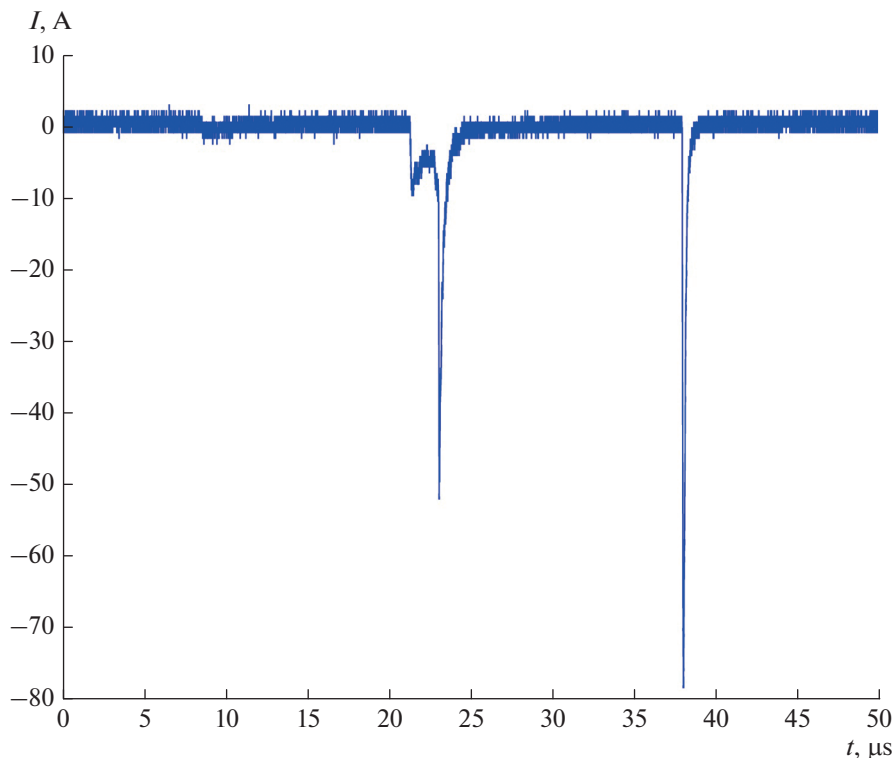


Рис. 6. Осциллограмма тока главной стадии разряда, при двухударном разряде из системы искусственных грозовых ячеек отрицательной полярности с участием группы модельных ГМ класса К2, расположенных в зоне 2.

женными. Более того, наблюдается рост вероятности $P_{2ГМ}$ инициирования и стимулирования распространения канальных разрядов из грозовых ячеек одновременно обеими группами модельных ГМ, когда расстояние между ними становится меньше продольных размеров группы ГМ.

Аналогичная тенденция проявляется и для интенсивности (I) формирования канальных разрядов между униполярными искусственными грозовыми ячейками и землей группами модельных гидрометеоров (табл. 3). С увеличением расстояния между вводимыми группами модельных ГМ частота формирования канальных разрядов между грозовыми ячейками и землей растет. Особенно явно эта тенденция проявляется в случае отрицательно заряженных ячеек, когда обе группы сформированы из модельных ГМ класса 1 (при увеличении расстояния в 2.5 раза рост интенсивности в 3–6 раз).

Это, возможно, связано с тем, что при относительно близком расстоянии между группами модельных ГМ, когда они смещены относительно друг друга в горизонтальном направлении, может возникнуть “конкуренция” между группами при инициировании и стимулировании разряда из облака, состоящего из нескольких грозовых ячеек, в землю и каждая из них может инициировать или стимулировать разряд в землю по отдельности, не всегда успев “подключить” к разрядному процессу соседнюю группу. С увеличением расстояния между нижней и верхней группами модельных ГМ, вводимых в грозовые ячейки, более вероятным становился последовательный сценарий, когда канальный разряд инициировался нижней группой модельных ГМ, кото-

Таблица 3. Влияние расстояния L_{12} между группами модельных гидрометеоров различного класса на инициирование и стимулирование канальных между униполярными искусственными грозвыми ячейками и землей

Варианты введения групп модельных гидрометеоров	Полярность ячеек	Вероятность P и интенсивность T формирования канальных разрядов с участием групп ГМ				
		P_{Σ} , о.е.	$P_{1ГМ}$, о.е.	$T_{1ГМ}$, с	$P_{2ГМ}$, о.е.	$T_{2ГМ}$, с
K2(1) + K2(2) ($L_{12} = 45$ см)	отриц.	0.999	0.454	0.94	0.545	3.63
K2(1) + K2(2) ($L_{12} = 45$ см)	положит.	0.682	0.500	6.11	0.182	55.0
K2(1) + K2(2) ($L_{12} = 38$ см)	отриц.	0.950	0.550	0.69	0.400	12.0
K2(1) + K2(2) ($L_{12} = 38$ см)	положит.	0.706	0.588	7.97	0.118	127.0
K3(1) + K2(2) ($L_{12} = 35$ см)	отриц.	0.867	0.200	10.37	0.667	4.06
K3(1) + K2(2) ($L_{12} = 22$ см)	отриц.	0.847	0.238	11.2	0.609	4.94
K2(1) + K2(2) ($L_{12} = 19$ см)	отриц.	1.000	0.625	2.5	0.375	20.0
K2(1) + K2(2) ($L_{12} = 19$ см)	положит.	0.700	0.400	9.68	0.300	60.0

рые располагались в области сильного электрического поля, а затем к нему “подключалась” верхняя группа модельных ГМ, стимулируя распространение разряды вверх, вглубь системы грозвых ячеек.

Изменение расстояния между соседними группами модельных ГМ, которые могут инициировать молнию типа “облако–земля”, может по-разному влиять на степень разрядки положительно или отрицательно заряженных частей грозвого облака.

Эксперименты с использованием отрицательно заряженных искусственных грозвых ячеек показали, что с увеличением расстояния между вводимыми в них группами модельных ГМ в 2.0–2.3 раза максимальные значения нейтрализованного облачного заряда возрастают на 25–30% (рис. 7). Это связано, возможно, с тем, что в случаях, когда вторая группа модельных ГМ подключает к каналу главного разряда верхнюю отрицательно заряженную ячейку, растет вероятность формирования повторного разряда и нейтрализации заряда не только нижней ячейки, но и значительной части верхней ячейки. При этом, средние значения нейтрализованного заряда слабо зависят от расстояния между группами гидрометеоров и составляют 17–20 мкКл. Аналогичная тенденция выявлена для значений амплитуды импульса тока главной стадии разряда, инициированного модельными гидрометеорами (рис. 8), когда, несмотря на изменение расстояния между группами модельных ГМ, амплитуды импульсов тока в большинстве случаев находились в диапазоне от 35 до 55 А.

При введении групп модельных гидрометеоров в систему положительно заряженных искусственных грозвых ячеек установлена четко выраженная зависимость снижения степени разрядки заряженных ячеек с увеличением расстояния между соседними группами ГМ (рис. 9). При увеличении расстояния между группами ГМ в 2.3 раза средние значения заряда облака, нейтрализованного в течение главной стадии разряда, уменьшаются в 1.5 раза, с 25 до 17 мкКл. Это связано с тем, что вероятность подключения через вторую группу модельных ГМ соседней верхней положительно заряженной ячейки к формированию главной стадии разряда между заряженными облака-

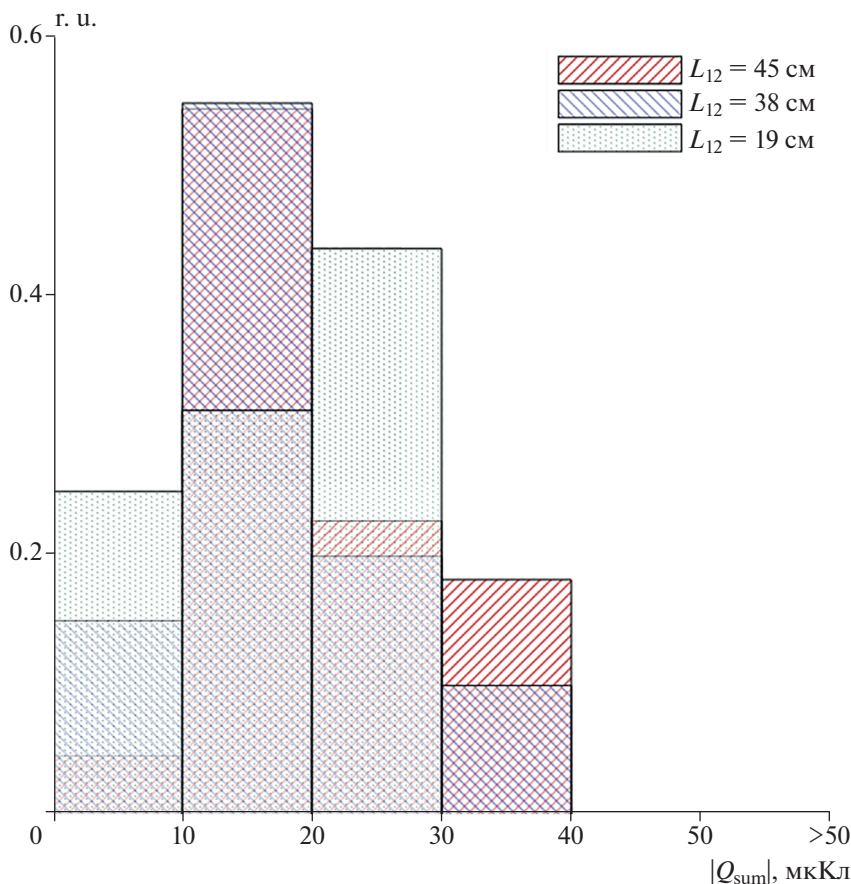


Рис. 7. Распределение значений заряда облака, нейтрализованного разрядом между отрицательно заряженными ячейками и землей с участием двух групп ГМ вида К2(1) + К2(2).

ми и землей и, соответственно, нейтрализации части ее заряда растет с уменьшением расстояния между соседними группами ГМ. В то же время амплитуды токов главной стадии разряда проявляют существенный разброс (рис. 10), их максимальные значения, наоборот, растут с увеличением расстояния между группами ГМ (от 110 до 180 А), хотя их средние значения для разных расстояний между группами модельных гидрометеоров находятся в достаточно узком диапазоне от 55 до 75 А.

3. Установлено, что для искусственного инициирования молнии из грозовых облаков, имеющих многоячеистую зарядовую структуру, при одновременном введении в них нескольких групп модельных гидрометеоров существенную роль играет способ объединения соседних групп модельных ГМ в инициирующую систему (табл. 4). Сравнение сделано для случая введения двух групп модельных гидрометеоров класса К2, вводимых в систему униполярных искусственных грозовых ячеек в области (1) и (2) при расстоянии между группами $L_{12} = 45$ см.

При отрицательной полярности искусственных грозовых ячеек замена воздушного промежутка между двумя группами модельных ГМ, вводимых в заряженные облака, на объединение двух групп тонкой диэлектрической леской слабо влияло на вероятность и интенсивность инициирования и стимулирования канальных разрядов между

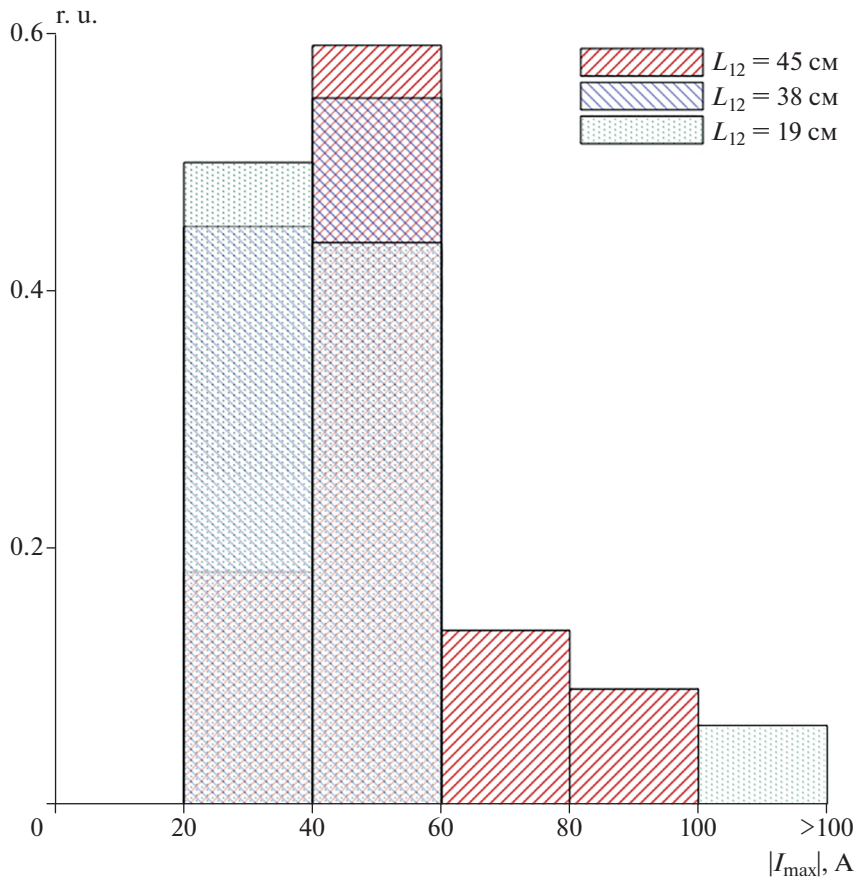


Рис. 8. Распределение значений амплитуды тока главной стадии разряда, инициированного двумя группами гидрометеоров вида K2(1) + K2(2) между отрицательно заряженными ячейками и землей.

искусственными грозowymi ячейками и землей. Более того, вероятность одновременного участия обеих групп в формировании разряда снижалась. При этом средние значения нейтрализованного заряда для обоих вариантов объединения групп ГМ составляли 20–22 мкКл.

Таблица 4. Влияние варианта объединения групп модельных гидрометеоров на инициирование и стимулирование канальных разрядов между одноименно заряженными искусственными грозowymi ячейками и землей

Полярность ячеек	Способ объединения групп	Вероятность P и интенсивность T формирования канальных разрядов с участием групп ГМ				
		P_{Σ} , о.е.	$P_{1ГМ}$, о.е.	$T_{1ГМ}$, с	$P_{2ГМ}$, о.е.	$T_{2ГМ}$, с
отриц.	воздух	0.999	0.454	0.94	0.545	3.63
отриц.	диэлектрическая леска	0.974	0.579	1.29	0.395	12.95
положит.	воздух	0.682	0.500	6.11	0.182	55.0
положит.	диэлектрическая леска	0.882	0.235	2.7	0.647	5.42

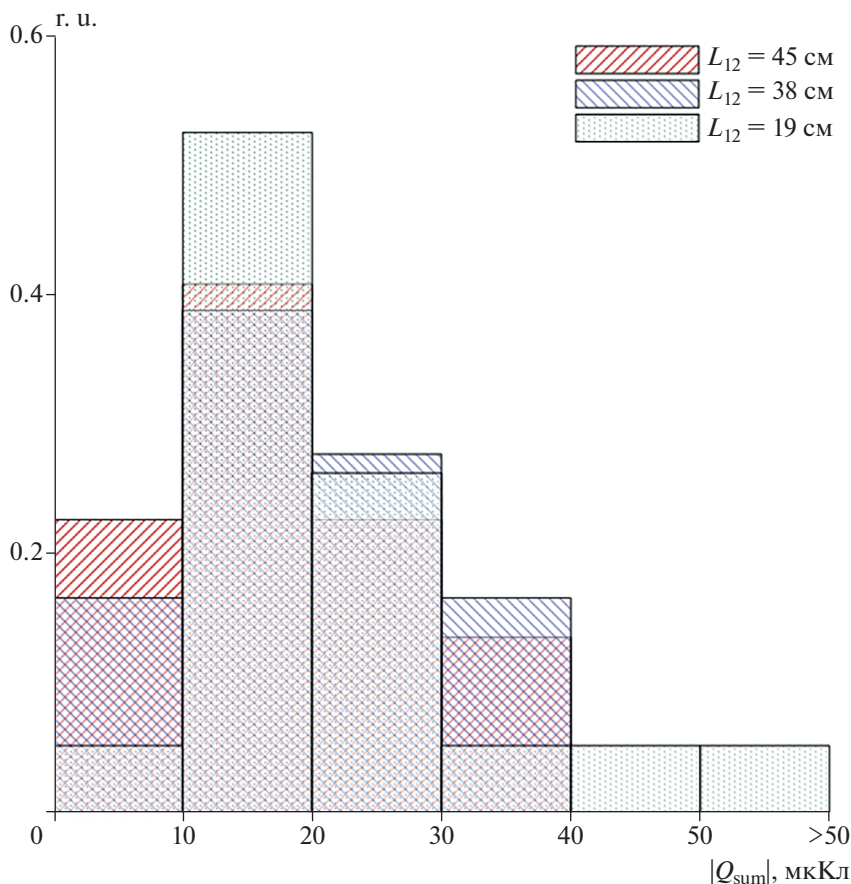


Рис. 9. Распределение значений заряда облака, нейтрализованного разрядом между положительно заряженными ячейками и землей с участием двух групп ГМ вида К2(1) + К2(2).

В то же время объединение диэлектрической леской двух групп модельных ГМ, вводимых в систему положительно заряженных искусственных грозовых ячеек, в несколько раз повысило вероятность участия обеих групп ГМ в развитии разряда между ячейками и землей (с 0.182 до 0.647) и на порядок увеличило интенсивность канальных разрядов с участием обеих групп модельных ГМ. При этом в среднем на 30% возростала и величина нейтрализованного облачного заряда (с 16.9 мкКл до 22 мкКл).

ВЫВОДЫ

Таким образом, установлены следующие возможные специфические особенности способов применения групп модельных гидрометеоров с целью успешного искусственного инициирования молнии “облако-земля” и стимулирования разрядки грозового облака.

Одновременное введение нескольких групп модельных гидрометеоров в области основного отрицательного или положительного облачного заряда не только существенно увеличит вероятность инициирования канального разряда между облаком и землей, но и обеспечит нейтрализацию существенно большего объема облачного за-

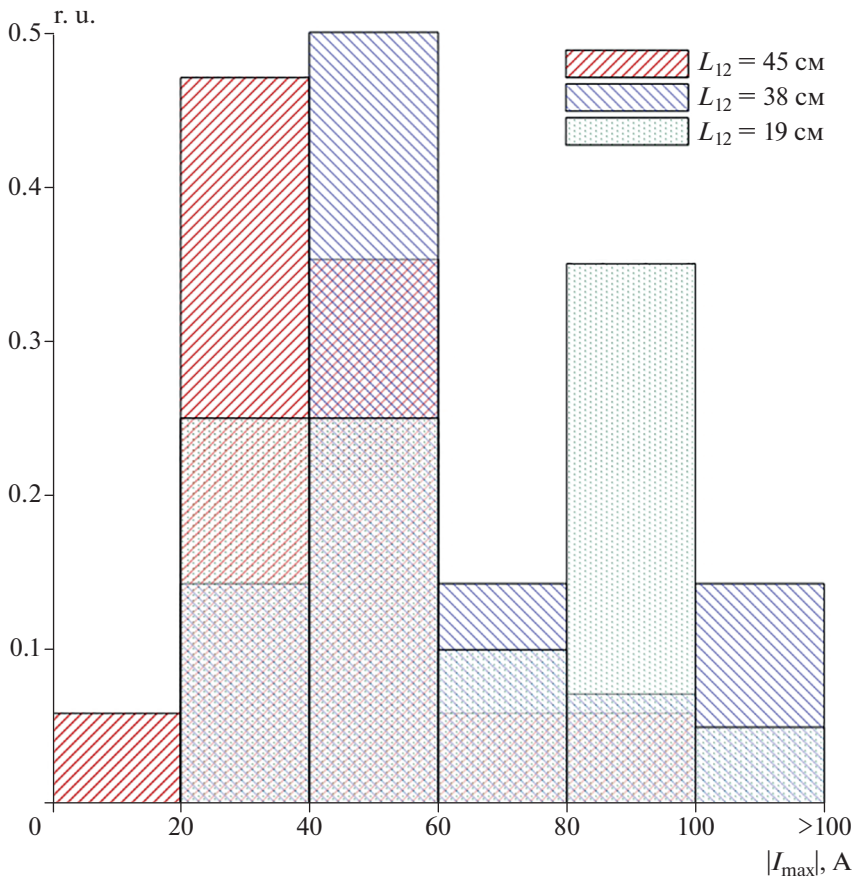


Рис. 10. Распределение значений амплитуды тока главной стадии разряда, инициированного двумя группами гидрометеоров вида K2(1) + K2(2) между положительно заряженными ячейками и землей.

ряда, в том числе стимулируя развитие т.н. возвратных стримеров [17] и/или провоцируя формирование повторных ударов молнии в землю [13, 18].

При этом часть (одна или несколько) из групп модельных гидрометеоров должна вводиться в нижнюю часть нижней грозовой ячейки и даже частично ниже границы грозового облака. Эксперименты с искусственными грозовыми ячейками показали, что при формировании таких групп наиболее подходяще использовать модельные гидрометеоры 3-го класса или комбинацию модельных гидрометеоров 2-го и 3-го класса.

При использовании групп модельных ГМ для инициирования разряда из системы отрицательно заряженных грозовых ячеек, расстояния между соседними группами модельных ГМ будут одним из ключевых факторов. Вероятность искусственного инициирования молнии “облако-земля” ожидается более высокой, если расстояние между группами ГМ будет составлять 1.5–2.5 линейных размеров самих этих групп. При этом, в целом возрастет и степень разрядки основного отрицательного заряда грозового облака. Поэтому, хотя объединение диэлектрической леской нескольких групп в единую систему относительно слабо влияло на вероятность инициирования разряда между грозовыми ячейками и землей и степень разрядки облака, оно позволит под-

держивать оптимальное расстояние между группами модельных ГМ и обеспечивать максимальную эффективность этих процессов.

Для положительного заряженных грозовых ячеек такого выраженного влияния расстояния между вводимыми группами модельных ГМ на вероятность искусственного инициирования нисходящей положительной молнии не выявлено. В то же время найден способ существенного увеличения этой вероятности и стимулирования нейтрализации положительного облачного заряда путем объединения групп модельных ГМ тонкой диэлектрической леской в общую систему.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00160).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
2. *Lightning: Principles, Instruments and Applications. Review of Modern Lightning Research.* Eds.: *H.D. Betz, U. Schumann, P. Laroche.* Springer, 2009.
3. *J.R. Dwyer, V.A. Uman.* The physics of lightning. *Phys. Rep.*, vol. 534, 2014, pp. 147–241.
4. *R. Solomon, C. Adamo, M. Baker.* A lightning initiation mechanism: application to a thunderstorm electrification model. *C. R. Physique*, 2002, vol. 3, pp. 1325–1333.
5. *C. Emersic, P.L. Heinselman, D.R. MacGorman, E.C. Bruning.* Lightning activity in a hail-producing storm observed with phased-array radar. *Monthly Weather Review*, 2011, vol. 139, pp. 1809–1824.
6. *M. Stolzenburg, T.C. Marshall.* Charge structure and dynamics in thunderstorms. *Space Science Reviews*, 2008, vol. 137, <https://doi.org/10.1007/s112214-008-9338-z>
7. *A. Mazur.* Principles of lightning physics. IoP Publishing, Bristol and New York, 2016.
8. *M. Akita, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki.* Observations of Bipolar Lightning Flashes Using the VHF Broadband Digital Interferometer. EMC'09/Kyoto, 24S2-2, 2009 IEICE, pp. 785–788.
9. *N. Pineda, T. Rigo, J. Montanyà, O.A. van der Velde.* Charge structure analysis of a severe hailstorm with predominantly positive cloud-to-ground lightning. *Atmos. Res.*, 2016, vol. 178–179, pp. 31–44.
10. *F.G. Zoghoghzy, M.B. Cohen, R.K. Said, S.S. Basilio, R.J. Blakeslee, and U.S. Inan.* Lightning activity following the return stroke. *J. of Geophys. Res.: Atmospheres*, 2014, <https://doi.org/10.1002/2014JD021738>
11. *Темников А.Г., Черненский Л.Л., Орлов А.В., Лысов Н.Ю., Журавкова Д.С., Белова О.С., Герастенок Т.К.* Применение искусственных грозовых ячеек для исследования проблем инициирования молнии между грозовым облаком и землей. *Известия Академии Наук. Энергетика*, 2017. № 2. С. 1–14.
12. *A. Temnikov, L. Chernensky, N. Lysov, A. Orlov, O. Belova, T. Gerastenok, D. Zhuravkova, I. Kalugina.* Simulation of processes of artificial lightning initiation by model hydrometeors array using artificial thunderstorm cells. 9th European Conference on Severe Storms, 2017, Pula, Croatia, ECSS2017-57-1.
13. *Темников А.Г., Черненский Л.Л., Орлов А.В., Лысов Н.Ю., Белова О.С., Журавкова Д.С., Кившар Т.К., Калугина И.Е.* Исследование влияния гидрометеоров на инициирование и распространение повторных разрядов из системы отрицательно заряженных искусственных грозовых ячеек. *Труды VI Российской конференции по молниезащите*, 2018, Санкт-Петербург, с. 89–96.
14. *Темников А.Г., Черненский Л.Л., Орлов А.В., Лысов Н.Ю., Белова О.С., Журавкова Д.С., Кившар Т.К.* Искусственное инициирование молнии в грозовых облаках группами модельных гидрометеоров. *Электротехника*, 2018. № 8. С. 39–45.
15. *Wu T., S. Yoshida, Y. Akiyama, M. Stock, T. Ushio, Z. Kawasaki.* Preliminary breakdown of intra-cloud lightning: Initiation altitude, propagation speed, pulse train characteristics, and step length estimation. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2015, vol. 120, pp. 9071–9086.
16. *Wu T., Wang D., Takagi N.* Locating preliminary breakdown pulses in positive cloud-to-ground lightning. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123, pp. 7989–7998.
17. *V. Mazur, L.H. Ruhnke, T.A. Warner, R.E. Orville.* Recoil leader formation and development. *J. of Electrostatics*, vol. 71, no. 4, 2013, pp. 763–768.
18. *Ferro M.A.S., M.M.F. Saba, O. Pinto.* Time-intervals between negative lightning strokes and the creation of new ground terminations. *Atmospheric Research*, 2012, vol. 116, pp. 130–133.

Peculiarities of Artificial Initiation of Cloud-to-Ground Lightning and Stimulation of Thundercloud Discharging by Model Hydrometeor Groups**A. G. Temnikov^{a, #, ##}, L. L. Chernensky^a, A. V. Orlov^a, N. Yu. Lysov^a,
O. S. Belova^a, T. K. Kivshar^a, and D. S. Zhuravkova^a**^a*National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia*[#]*e-mail: TemnikovAG@mpei.ru*^{##}*e-mail: a_g_temnikov@mail.ru*

The article presents the generalized results of the check of the main propositions of the scientific and engineering means of artificial initiation of a cloud-to-ground lightning in thundercloud using groups of model hydrometeors considering the small-scale charge structure of the thundercloud. Possible specific peculiarities of the model hydrometeor group application for artificial lightning initiation and stimulation of the thundercloud discharging having the local regions with the increased volume charge density have found. It was established that with an increase in the number of groups of model hydrometeors introduced into thunderstorm cells, the probability and frequency of development of channel discharges between the cloud and the ground with the participation of hydrometeors increases. At the same time, the degree of the cloud discharging increases several times, compared to the case of using a single group of hydrometeors – the value of the neutralized charge of the cloud increased by 3–4 times and the current amplitude of the main discharge doubled. The effect of the distance between groups of model hydrometeors on the probability and intensity of discharge processes was revealed. It is shown that with an increase in the distance between the groups, the probability and intensity of channel discharges to the ground from negatively charged cells increases. With a positive polarity of thunderstorm cells, an increase in the probability of initiation and propagation of channel discharges is observed when the distance between hydrometeor groups becomes smaller than the longitudinal size of the group. Depending on the polarity of the thunderstorm cells, the influence of the method of connecting several groups of model hydrometeors on the probability of discharge formation between the cells and the ground and the cloud discharging was experimentally established. In the case of negative polarity of thunderstorm cells, the combination of the two groups with a dielectric string had relatively weak effect on the probability and intensity of an initiation and stimulation of the channel discharges between the artificial thunderstorm cells and the ground. With a positive polarity of artificial charged clouds, the grouping of a dielectric string by several times increased the likelihood of the participation of both groups of hydrometeors in the development of a discharge between cells and the ground, while the value of the neutralized charge of the cloud increased too.

Keywords: artificial thunderstorm cell of positive and negative polarity, thundercloud, artificial lightning initiation, peculiarities, experimental investigation, group of model hydrometeors, channel discharge, hydrometeor form