

Раздел II. Анализ данных и моделирование

УДК 551.594.221

DOI 10.18522/2311-3103-2026-4-170-180

М.Н. Бейтуганов, Х.Х. Чочаев

РОЛЬ МОЛНИЙ В ПЕРЕХОДЕ ОБЛАКА ИЗ ГРОЗОВОГО СОСТОЯНИЯ В ГРАДОВОЕ И ИХ ИСКУССТВЕННОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ КАК МЕТОД ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГРАДООБРАЗОВАНИЯ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСАДКОВ

Переход грозового состояния облака, сопровождаемого интенсивными молниевыми разрядами, в градовое происходит в результате зарождения и роста в нём зародышей града в капельной и крупных формах. Вертикальная протяжённость объёма, где образуются зародыши на гигантских частицах микропримеси атмосферы (ГАЧ), находится между изотермами от -2°C до -15°C . Ледяные кристаллы растут за счёт сублимации и коагуляции с переохлаждёнными облачными каплями. В этом же объёме между изотермами температур от -5°C до -16°C происходят разряды с максимальным количеством молний на высоте с температурой -10°C . Молниевый разряд внедряет в облачное пространство избыточный объёмный заряд с концентрацией ионов порядка 10^{17} см^{-3} . Положительные молнии внедряют положительные ионы, а отрицательные – отрицательные ионы. Эти ионы осаждаются на ГАЧ, концентрации которых в предградовых ситуациях составляют около 10^5 м^{-3} . Избыточные заряды на частицах превращают ГАЧ в зародыши града. Отрицательный заряд на ГАЧ, способствуя зарождению на частице плоскостных кристаллических структур, образует крупный зародыш града. Положительный заряд на ГАЧ образует нитевидные структуры, которые обламываются, и фрагменты, контактируя с переохлаждёнными крупными каплями и замораживая их, приводят к образованию капельных зародышей града. Для предотвращения града, наземных молний и перераспределения осадков предложен метод, основанный на инициировании искусственных молний. Приведены способы инициирования искусственных молний с помощью: плазменных образований, получающихся при подрыве в грозоградовых облаках 100 мм артиллерийских снарядов, специальной ракеты с детонирующим шнуром, противоградовой ракеты с токопроводящей поверхностью. Установлено значительное изменение радиолокационной отражаемости грозоградового облака, под действием искусственно инициированной молнии. По результатам предварительных экспериментов по предотвращению града, предложен метод предотвращения и прерывания града «реагент плюс искусственно инициированные молнии». Исходя из установленного факта о выпадении около 10 т осадков при каждом молниевом разряде с помощью искусственно иницируемых молний можно перераспределять осадки, предотвращать наземные молнии и т.д. В перспективе для инициирования искусственных молний внутри грозоградовых облаков следует использовать беспилотные летательные системы, а в околооблачном пространстве – квадрокоптеры.

Гроза; молния; градообразование; облако; атмосфера; активные воздействия.

M.N. Beituganov, Kh.Kh. Chochaev

ROLE OF LIGHTNING IN THE CLOUD TRANSITION FROM THUNDERSTORM TO HURRICANE AND THEIR ARTIFICIAL INITIATION AS A METHOD OF PREVENTING HURRICANE AND PRECIPITATIONS REDISTRIBUTION

The transition of the cloud, thunderstorm state, accompanied by intensive lightning discharges, to hail occurs as a result of the nucleation and growth of hail nuclei in the drop and grain forms. The vertical extent of the volume where nuclei where are formed on giant particles of micro-impurities in the atmosphere (GPA) is between the isotherms from -2°C to -15°C . Ice crystals grow due to sublimation and coagulation with supercooled cloud droplets. In the same volume, between the isotherms of temperatures

from -5°C to -16°C , discharges occur with the maximum number of lightning strikes at an altitude of -10°C . Lightning strikes introduce an excess volume charge with an ion concentration of about 10^{17} cm^{-3} into the cloud space. Positive lightning strikes introduce positive ions, while negative lightning strikes introduce negative ions. These ions are deposited on the GPA, which have concentrations of about 10^5 m^{-3} in pre-hail situations. The negative charge on the GPA, contributing to the nucleation of planar crystal structures on the particle, forms a granular hailstone. The positive charge on the GPA forms filamentous structures that break off, and the fragments, when they come into contact with supercooled large droplets and freeze them, lead to the formation of droplet hailstones. To prevent hail, ground lightning, and the redistribution of precipitation, a method based on the initiation of artificial lightning has been proposed. Methods of initiating artificial lightning are given using: plasma formations resulting from the detonation of 100 mm artillery shells in thunderstorm-hail clouds, a special rocket with a detonating cord, and an anti-hail rocket with a conductive surface. A significant change in the radar reflectivity of a thunderstorm-hail cloud has been observed under the influence of an artificially initiated lightning strike. Based on the results of preliminary experiments on hail prevention, the method of preventing and interrupting hail using "reagent plus artificially initiated lightning" has been proposed. Given the established fact that approximately 10 tons of precipitation are released with each lightning strike, it is possible to redistribute precipitation, prevent ground-based lightning, and more using artificially initiated lightning. In the future, unmanned aerial systems should be used to initiate artificial lightning within thunderstorm clouds, while quadcopters should be used in the vicinity of clouds.

Thunderstorm; lightning; urban development; cloud; atmosphere; active influences.

Введение. Известно, что градовое состояние облака наступает как стадия развития грозового облака. Практически град выпадает из зрелых грозовых облаков, в которых происходят электрические разряды. Эти разряды могут быть видимыми или слышимыми внутриоблачными или наземными молниями. Кроме них, в облаках происходят так называемые инципиентные молнии, т.е. электрические разряды длиной меньше, чем длина ступени лидера молнии. Стримерные зоны лидеров этих типов разрядов внедряют в пространства, которые они пронизывают по пути своего распространения, избыточный объёмный заряд (ИОЗ). Заряд ионов в ИОЗ такой же что и заряд головки распространяющегося лидера: отрицательный лидер внедрит отрицательный ИОЗ, положительный – положительный ИОЗ. Концентрация ионов в ИОЗ достигает 10^{17} м^{-3} . Объём пространства, занимаемый стримерной зоной лидера, в частности, молнии определяется протяжённостью молнии, достигающей 100–300 м [1]. Поперечное сечение этого пространства можно оценить исходя из величины угла вершины, конусообразной стримерной зоны лабораторной искры порядка 15° [2]. Тогда соответствующие этим стримерам радиусы будут равны 26 и 78 м. Таким образом, объём, занимаемый ИОЗ будет представлять собой тело вращения с длиной, равной длине извилистой молнии и диаметрами от 26 до 78 м.

Цель работы – разработка методов предотвращения и прерывания града: «реагент плюс искусственно инициированные молнии», а также перераспределения осадков.

Градообразование в грозовом облаке. Процесс перехода грозового состояния облака в градовое происходит в результате зарождения и превращения в град капельных и крупяных зародышей града. Зародыши града образуются в интервале температур от -2°C до -15°C на крупных частицах микропримеси, которые условно разделены на гигантские (ГАЧ) с размерами от 1 до 30 мкм и сверхгигантские (СГАЧ) с размерами от 30 до 60 мкм и больше [3–6].

Вероятность выпадения града возрастает с увеличением ударов молний до 70 в минуту, но при большей частоте ударов града не наблюдалось [7]. В работе [8] установлено, что вероятность наступления суровых погодных условий и, следовательно, образования града очень быстро возрастала с увеличением количества положительных наземных молний. Возрастание числа положительных наземных молний сопровождалось выпадением града. По мнению авторов работы [9] в случае высокой интенсивности положительных молниевых разрядов на землю они происходят вокруг ядра с высокой отражательной способностью или во всей области с высокой отражаемостью. Общая грозовая активность имеет тенденцию приводить к неблагоприятным погодным условиям на земле или к, так называемой, суровой погоде [10], когда шторм переходит в последнюю стадию при зарождении фидерных облаков вокруг материнского облака.

О масштабах облачного пространства, занимаемого одним молниевым разрядом, можно судить по установленным в работах [11, 12] вертикальных и горизонтальных проекциях молний, которые составляют около 13-14 км.

Внутриоблачные молнии развиваются не симметрично, что объясняется различием скорости прорастания отрицательного и положительного ветвей [13]. Это приводит к большей длине отрицательной ветви (корня), чем к положительной ветви кроны. Тогда в стримерные зоны лидеров этих ветвей будут внедрять соответствующие ИОЗ с одноименными знаками. Как результат, в корне будут зарождаться капельные зародыши града, а в кроне – крупные.

Основным процессом, приводящим к зарождению зародышей града в грозовом облаке и превращающим грозовое облако в градовое мы считаем процесс зарядки ГАЧ и СГАЧ в ИОЗ, во внедряемые в облачную среду внутриоблачными и наземными молниями [11]. В работе [14] установлено, что молниевые разряды в грозовом облаке происходят между изотермами -5°C и -16°C , а большинство из них – вблизи изотермы -10°C . Концентрации ГАЧ и СГАЧ в предградовые дни могут достигать значения 10^4 – 10^5 м^{-3} [3]. Так как электрическое поле грозового облака восстанавливается за несколько секунд после молниевых разрядов, то следует учесть два механизма зарядки частиц – диффузионный и зарядка в электростатическом поле, которые даются соответственно формулами (1). В результате на ГАЧ и СГАЧ начинают оседать избыточные заряды [12]:

$$N_1 = \frac{dkT}{2e^2 \ln(1 + \pi dcNe^2t / 2kT)}, \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{2\varepsilon_0 d^2 E}{4e(\varepsilon_0 + 2)}$$

где d – диаметр частицы, k – постоянная Больцмана, t – время зарядки, N_1 и N_2 – средние концентрации положительных и отрицательных ионов, c – среднеквадратическая скорость иона, T – температура в градусах Кельвина, ε_0 – диэлектрическая проницаемость частицы, E – напряжённость электростатического поля e – заряд электрона.

По оценочным расчётам по первой формуле из (1) на частицу с $d = 60$ мкм из-за диффузии за $t=1$ с осадут около $4,8 \cdot 10^4$ ионов, а на частицу с $d = 30$ мкм – около $2 \cdot 10^3$ ионов. Такие заряды на частицах получены при $T = 273^{\circ}\text{K}$, концентрацией $N = 10^{17} \text{ м}^{-3}$, $c = 4,5 \cdot 10^2 \text{ м/с}$. $\varepsilon_0 = 4$.

При зарядке в электростатическом поле на частицу с $d = 60$ мкм, $E = 100 \text{ кВ/м}$, на частицу осадут $1,25 \cdot 10^5$ ионов, а на частицу с $d = 30$ мкм – $3 \cdot 10^4$ ионов. При оценке роли заряженных гигантских частиц в образовании зародышей града следует учесть следующее.

Исследованиями института кристаллографии установлено, что зарождение кристаллических структур на поверхности подложек зависит от знака заряда на ней [13]. Так, только отрицательный заряд на поверхности способствует зарождению на ней плоскостных структур, которые впоследствии растут блочно, а при положительных зарядах образуются нитевидные структуры, не способные к блочному росту. С учётом этих исследований можно заключить, что на отрицательно заряженных ГАЧ и СГАЧ ледяные кристаллы, вырастая блочно, превращаются напрямую в крупные зародыши. На положительно заряженном ГАЧ и СГАЧ образуются нитевидные кристаллики, которые обламываются и их фрагменты, сталкиваясь с переохлажденными каплями, замораживают их, образуя капельные зародыши града. Часть крупных зародышей, контактируя с переохлажденными каплями, могут также образовать капельные зародыши града. Ясно, что только крупные частицы, на которых осадут большее количество ионов, превратятся в зародыши града.

Таким образом, переход грозовой стадии развития облака в градовую обусловлен формированием зародышей града на заряжающихся в ИОЗ гигантских частиц микропримеси атмосферы. Совпадением интервалов температур, где происходят молниевые разряды – между изотермами -5°C и -16°C и образование капельных и крупных зародышей града – между изотермами температур от -2°C до -15°C , можно объяснить главную роль молниевых разрядов в переходе облака из грозового состояния в градовое.

Интенсивные молниевые разряды, внедряющие в облачную среду множество ИОЗ и создающие большее количество зародышей града, способствуют перераспределению водности между ними и, тем самым, уменьшают размеры градин. В этом случае зрелое грозовое облако не переходит в градовое облако. Если же число молниевых разрядов недостаточно для образования необходимого количества зародышей града, то зародыши вырастая, превращаются в градины и наступает градовая стадия развития. В качестве предварительного условия образования града сотрудниками Высокогорного геофизического института указывается интенсивность молниевых разрядов 5 разрядов в минуту [14]. Если интенсивность меньше 5, то активное воздействие на градовое облако можно прервать. Указывая на взаимную обусловленность молниевых разрядов и града, в работе [15, 16] приводятся данные о том, что грозовое облако становится не градоопасным, если число внутриоблачных молний превышает 71 разрядов в минуту. На отсутствие града в грозо градовых облаках при интенсивностях до 10 разрядов в минуту и выше 70 разрядов в минуту указано также в этой работе. На основании двух последних работ можно предположить, что увеличением интенсивности молниевых разрядов выше 70 разрядов в минуту можно прервать град из грозоградовых облаков.

Комбинированный метод предотвращения града. Сравнение вышеуказанных величин интенсивностей представляет особый интерес в связи с предлагаемым нами комбинированным методом предотвращения града – «реагент плюс искусственно инициируемые молнии» [17]. Основанием предложенного метода являются экспериментально доказанные возможности инициирования в грозоградовых облаках искусственных молний (ИМ) с помощью: взрывающихся в них артиллерийских снарядов [18] и специальных ракет с детонирующим шнуром [19], противораковых ракет с токопроводящей поверхностью (ТПП) [18].

В работе [19] ИМ инициировались плазменным образованием, получающимся при подрыве в грозоградовом облаке 100мм артиллерийских снарядов. Было установлено, что после инициированной молнии происходит колоссальное изменение радиолокационной отражаемости (РЛО) облака, выражающееся в снижении высоты с максимальной РЛО: высота отражаемости 35 dBZ снизилась примерно на 1км, а 45 dBZ на 2км (рис. 1). Подрыв снаряда производился на высоте около 7 км между верхним + Р зарядом и нижним – N зарядом. Возникновение ИМ идентифицировалось четырьмя приборами: микрофоном, фиксировавшим запуск снаряда и его подрыв в облаке по звуку; радиоприёмником, регистрировавшим атмосферик от ИМ; флюксометром, регистрировавшим изменения напряжённости поля у поверхности земли; измерителем тока короны с заземлённого острия. По совпадению изменений во времени измеряемых параметров, идентифицировался факт инициирования ИМ. В результате в этих экспериментах 11 снарядами были инициированы 9 ИМ.

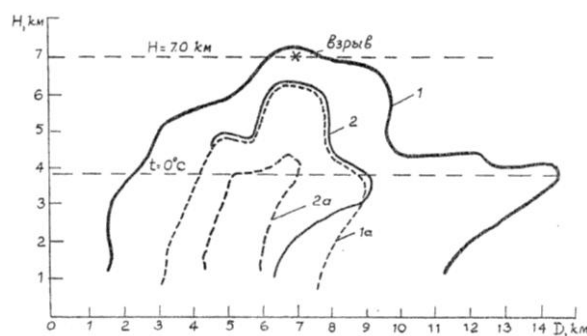


Рис. 1. Картина изменения РЛО под действием инициированной ИМ: кривые 1 и 2 соответствуют отражаемостям 35 dBZ и 45 dBZ, 1а и 2а через 2÷3 мин после инициирования ИМ

Как видно, кроме снижения высот РЛО, площади обоих контуров РЛО уменьшаются значительно.

Применимость ракет с ТПП для инициирования ИМ, а также их влияние на РЛО грозового облака экспериментально исследованы в работе [18, 20]. Выбор объектов воздействия проводился по высоте отражаемости 45 dBZ. Изменения РЛО в этих экспериментах показаны на рис. 2 и 3.

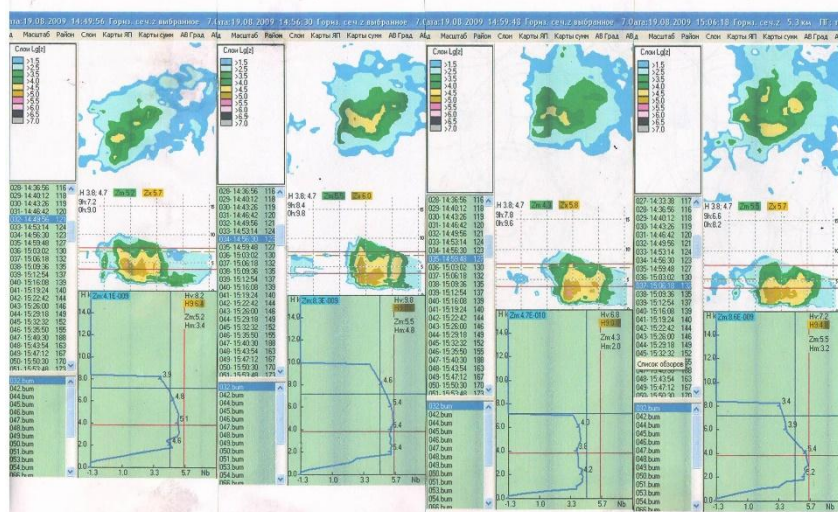


Рис. 2. Изменения РЛО через 3-4 мин после инициирования ИМ 3 противоградовыми ракетами с ТПП

При угле запуска около 60 градусов ракета входит в грозовое облако и находится там около 30–35 с. Тогда по траектории полёта ракеты и при её самоликвидации, она может инициировать ИМ много раз. Трудность их идентификации связана с неизвестностью траекторий иницируемых молний. Отмечаемые грозопеленгатором LG 8000 последовательные по времени молнии могут быть в указанном промежутке времени нахождения ракеты в облаке связаны именно с иницированием ИМ последней. На начальном участке полёта ракеты до 2,2 км, т.е. когда она не «вошла» в зону, где напряжённости поля от грозового облака велики, не должны появляться ИМ. Запуски противоградовых ракет с ТПП производились с ПВ 11 вблизи г. Баксан. Были запущены 3 ракеты с 15:55:00 до 15:57:53. Картины РЛО на рисунке по времени запаздывают на 1 час. В таблице цифрами в скобках отмечены количество точек, соединением которых получены траектории, иницированных ИМ.

Таблица

Пространственно-временные характеристики молний

Время, мин, с	Длина, км	Время, мин, с	Длина, км	Время, мин, с	Длина, км
55:00		56:00(2)	2,9	57:00	
55:15(2)	1,41	56:06(2)	1,78	57:02(7)	7,94
55:21(3)	3,96	56:18		57:06	
55:26		56:23		57:09	
55:28(7)	8,5	56:30(4)	4,05	57:27	
55:32		56:32		57:34	
55:35(5)	10,2	56:37(5)	9,5	57:37(2)	3,3
55:51		56:38(3)	7,8	57:44	
		56:44		57:48	
				57:53(2)	2,23

Первая ракета инициирует молнии по всей траектории полёта от объёмных зарядов, существующих по траектории полёта. Вторая ракета, двигаясь в среде с пониженной напряжённостью поля, начинает инициировать молнии на более дальних от ПВ расстояниях, так как электростатическое поле облака не успевает восстановиться ко времени появления ракеты в этой области. Третья ракета также инициирует ИМ на более дальних расстояниях. Последняя молния, скорее всего, инициирована ракетой при её самоликвидации, т.е. от плазменного образования – продуктов детонации. Таким образом, в объёме грозоградового облака с горизонтальной проекцией около 18 км^2 тремя ракетами инициированы 12 внутриоблачных (ВО) ИМ, с суммарной длиной около 57 км. Первая ракета за 51 с инициировала 4 ИМ длиной 21,4 км, вторая ракета за 44 с – 5 ИМ длиной 26 км и третья за 53 с – 3 ИМ длиной 8,2 км. За эти же 3 мин зарегистрированы 15 молний облака-земля (О-З) на этой же площади. Траектории ИМ восстанавливались соединением точек, где одновременно по секундам проявлялись составляющие молний в различных точках на горизонтальной проекции объёма облака. Такой подход к определению траекторий ИМ, по-видимому, правомочен, так как в основе разработки грозопеленгатора лежат исследования конца семидесятых годов, когда разделение молний О-З и ВО молний проводилось сравнением мощностей электромагнитного излучения молний-атмосфериков, получаемых горизонтальным и вертикальным антеннами. В частности, мы полагаем, что проявляемые одновременно в различных точках элементы извилистой молнии являются вертикальными участками траектории одной и той же молнии.

Некоторым подтверждением такого подхода является время восстановления электростатического поля грозоградового облака для последующей молнии, достигающей несколько секунд. Изменение картины РЛЮ со временем под действием искусственно инициированных 12 внутриоблачных молний и 15 наземных молний приведены на рис. 2.

Объём облачного пространства, в который происходит внедрение ИОЗ, состоит из объёма, охватываемого стримерными зонами инициированных ИМ и, объёма, занимаемого кроной наземных молний (О-З). Принято считать, что $2/3$ длины молнии О-З находится внутри грозового облака. Тогда для средней молнии, длиной около 9 км получим, что крона «проникает» в облако на 6 км. Объём облака, разряжающаяся одной наземной молнией, может достигать кубические километры. Считая, что за 3 мин общая длина проникающих в облако частей молний составляет 90 км, получим длину всех молний около 150 км. Для оценки объёма облака, в котором происходит внедрение ИОЗ стримерной зоной лидера молнии (СЗЛМ) можно выбрать средний радиус стримерной зоны, равный около 45 м. Тогда получим приблизительный объём облачного пространства, в котором внедряется ИОЗ, равный $6,76 \cdot 10^8 \text{ м}^3$. Выше отмечено, что в штормовые дни концентрации ГАЧ и СГАЧ в грозовых облаках могут достигать 10^4 м^{-3} и более. Допуская, что в процессе осаднения на эти частицы ионов из ИОЗ они становятся источниками капельных и крупяных зародышей града, получим около $7 \cdot 10^{12}$ шт. и, которые конкурируя с естественными зародышами града за облачную водность, предотвратят град. Более мелкие частицы ЧМА также осаждают на себя ионы из ИОЗ. В зависимости от знака заряда и окружающей температуры они становятся облачными ядрами конденсации или сублимации. Свободные отрицательные ионы становятся ядрами конденсации, притягивая дипольные молекулы водяного пара, что приведёт к «высушиванию» объёма с ИОЗ и образованию облачных капель. Второй опыт по воздействию на градоопасное облако инициированием ИМ приведён на рис. 3 [18].

Ниже приведен фрагмент регистрации ИМ и молний О-З грозопеленгатором (рис. 4). Масштаб фрагмента 1 см: 1 км. В этом опыте двумя ракетами за 1 мин 43 с инициированы 4 ИМ, протяжённостью 9,8 км. За это же время зафиксированы 11 молний О-З суммарной протяжённостью около 65 км.

Объём пространства, в которое внедряется ИОЗ, так же, как и выше, можно оценить исходя из суммарной протяжённости обеих молний и радиуса СЗЛМ, равной около 45 м, т.е. около $1,2 \cdot 10^8 \text{ м}^3$. Зарядка в этом объёме частиц ГАЧ и СГАЧ с концентрацией 10^4 м^{-3} , приводя к образованию капельных и крупяных зародышей града, способствует освоению капельной водности, и тем самым, сокращает время жизни облака. Как видно, из измене-

ний картин РЛО облака под действием наземных и ИМ, грозоградовое облако осаждается приблизительно за 20 мин, не переходя в градовое облако. По сравнению с используемым в противоградовой защите методом получения конкурирующих зародышей града внесением частиц кристаллизующего реагента (ЧКР) с размерами до 1 мкм, зарядившиеся в ИОЗ ГАЧ и СГАЧ с размерами от 30 мкм до 60 мкм и более, становятся источниками двух типов зародышей града, минуя время роста кристалла до 40-50 мкм [20]. Время образования зародышей града на ГАЧ и СГАЧ около 3-4 мин, поэтому реакция облака на процессы осадкообразования может колебаться между 4 и 10 мин. Опыт по применению предложенного метода предотвращения града «реагент плюс искусственно инициированная молния» провели 1 сентября 2021г. [17].

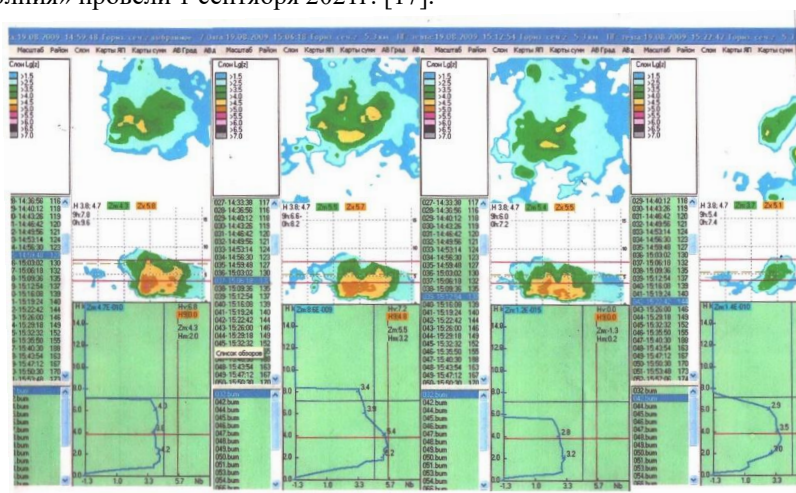


Рис. 3. АВ, проведенное на конвективную облачность инициированием ИМ

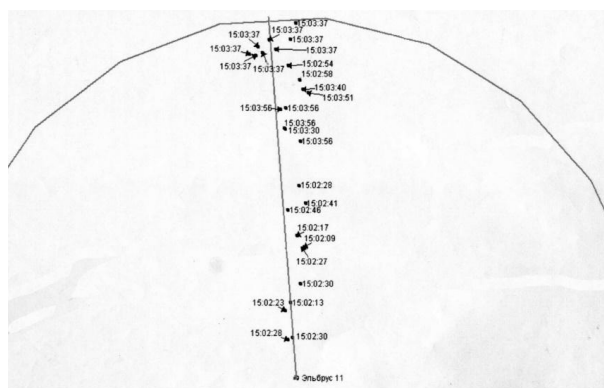


Рис. 4. Фрагмент регистрации грозопеленгатором LG8000 инициированных двумя ракетами ИМ и молний О-3

В день с воздействием был выбран объект воздействия (ОВ) 3 категории №5, который зародился в 15:20 вблизи селения Кёнделен и начал смещаться с скоростью около 20 км/час на защищаемую территорию – ЗТ КБР. При тенденции развития облака к усилению и росту града в нём, с 15:29 по 15:33 с пунктов воздействия (ПВ) вблизи селений Заюково и Верхний Куркужин тройками были запущены по 6 ракет с ТПП и 6 стандартных ракет с ПВ вблизи с. Кёнделен. Воздействие на облако №5 было продолжено с указанных ПВ с 15:35 по 15:42 запусками по 6 ракет с ТПП. В результате воздействия из ОВ №5 выпадали только ливневные осадки, В 15:47 это облако начало регенерировать и в районе г. Баксан появились новые гроззовые ячейки. В 16:02-16:04 с ПВ вблизи селения Кызбурун-2 была обработана передняя фронтальная область навеса радиоэха 6 ракетами с ТПП. Вблизи

облака №5 на высоте около 8 км в 16:05 локализовалась новая градоопасная ячейка №6. На этот ОВ 3 категории было запущено 6 ракет с ТПП с ПВ Кызбуруна-2. Всего на облако №6 израсходованы 10 ракет с ТПП. Выпадение града из ОВ 3 категории №5 и №6 не зафиксированы и это свидетельствует о том, что применение предлагаемого метода предотвращения града является обнадёживающим методом борьбы с градобитиями.

Различить возможные естественные молнии и искусственные на картине не представляется возможным. Однако дополнительный анализ времён запуска ракет и появления молний позволяет идентифицировать искусственные молнии (ИМ). Кроме того, кучность точек на северо-западном направлении от ПВ вблизи с. Заюково и в северном направлении вблизи с. Верхний Куркужин свидетельствует об инициировании ракетами с ТПП искусственных молний. Отсутствие такой кучности точек вблизи ПВ вблизи с. Кызбурун-2 на рис. 5, с которого также были запущены 12 ракет с ТПП, возможно, объясняется близостью датчиков грозопеленгатора, что может повлиять на идентификацию ИМ.

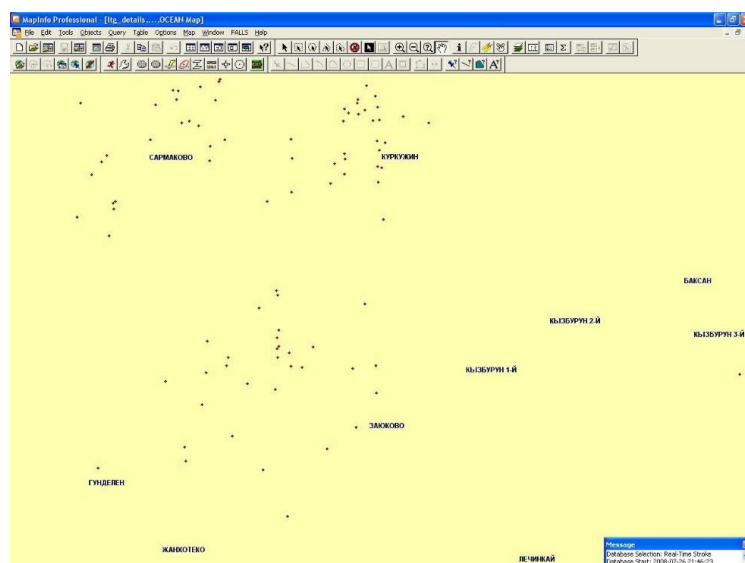


Рис. 5. Точки между селениями Кёндеден и Заюково и в районе селения Верхний Куркужин, соответствуют инициированным ИМ

По руководящему документу на грозоградовое облако с 13 ОВ 3 категории и 2 ОВ 2 категории с целью предотвращения града по принятому в противоградовых службах документам следовало бы потратить около 300 штатных противоградовых ракет.

Применение 35 противоградовых ракет с ТПП позволило сократить число ракет до 140 шт. Многочисленные ИМ, инициированные ракетами с ТПП, координаты которых фиксировались грозопеленгатором LG8000, способствовали предотвращению или уменьшению размеров града.

Заключение. Таким образом, физической основой предотвращения града с помощью комбинированного метода «реагент плюс искусственно инициируемые молнии» являются:

1. Создание конкурирующих с естественными зародышами града искусственных зародышей града:

- а) на ГАЧ и СГАЧ заряжающихся в избыточном объёмном заряде, внедряемом в облачное пространство искусственно ИМ;

- б) на частицах кристаллизующего реагента, вносимых в облако штатной противоградовой ракетой с ТПП.

2. Обрушение зон аккумуляции, образующихся между верхним + Р и нижним – N-зарядами, а также обрушение нижних +р зарядов, зависающих в электростатическом поле нижнего – N-заряда, которые происходит из-за ослабления электростатического поля искусственно инициируемыми молниями.

Кроме того, ракетами с ТПП, беспилотниками с проводниками в хвостовой части длиной в десятки метров можно защитить от молний и града различные объекты на земле: пусковые установки космических ракет, атомные электростанции, крупные электро-распределительные подстанции, ценные лесонасаждения, ограниченные площади – сады, табак, виноградники, теплицы и т.д. Так как инициируя молнии можно обрушить зоны аккумуляции – электроактивные зоны, в которых происходит рост частиц осадков в том числе и града, то искусственными молниями можно перераспределить осадки (по данным работ [18] каждый молниевый разряд приводит к выпадению 10^4 м^3 осадков).

Авторы выражают признательность профессору Куповых Г.В. за участие в обсуждении результатов исследований и подготовку статьи к публикации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. – М.: Гидрометеиздат. 1978. – 202 с.
2. Петров Н.И., Петрова Г.Н. Физические механизмы развития молниевых разрядов между грозовым облаком и ионосферой // ЖТФ. – 1999. – Т. 69. – Вып. 4. – С. 134-137.
3. Хоргуани В.Г. Микрофизика зарождения и роста града. – М.: Гидрометеиздат, 1984. – 184 с.
4. Blevins L.L., Marwitz J.D. Visual observations of lightning in Some Great Plains hailstorms // Weather. – 1968. – 23. – P. 192-194.
5. Branick M.L., and Deswell C.A. III. An observation of the relationship between supercell structure and lightning ground strike polarity // Weather Forecast. – 1992. – 7. – P. 143-149.
6. Carey L.D., and Rutledge S.A. Electrical and multiparameter Radar observations of a severe hailstorm // J. Geophys. Res. – 1998. – 103. – P. 13,979-14,000.
7. Williams E.R., et al. The behavior of total lightning activity in Severe Florida thunderstorms // J Atmos. Res. – 1999. – 51. – P. 245-264.
8. Proctor D.E. Lighting and precipitation in Small Multicellular Thunderstorm // J. Geophys. Res. – 1983. – Vol. 88, n. C9. – P. 5421-5440.
9. Proctor D.E. Radar Observations of Lightning // J. Geophys. Res. – 1981. – Vol. 86, C12. – P. 12109-12114.
10. Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., M. Hayakawa M. Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds // Climate and Atmospheric Science. – 2019. – P. 1-10.
11. Бейтуганов М.Н. Электрические разряды различных типов и молний как причина превращения частиц микропримеси атмосферы в зародыши града // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: Сб. научных трудов. Ч. 2. – Нальчик, 2017. – С. 249-256.
12. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. – М.: Мир, 1987. – 277 с.
13. Дистлер Г.И. Кобзрева С.А. Дальнодействие активных центров кристаллических поверхностей // ДАН СССР. – 1967. – Т. 172, № 5. – С. 1069-1071.
14. Медалиев Х.Х., Сижажев С.М. Изучение степени грозоопасности облаков и определении времени и места возникновения канала молнии // Тр. Высокотемпературного геофизического института. Вып. 29. Физика облаков и активных воздействий на градовые процессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – С. 3-11.
15. Soula S., Seity Y., Feral L., Sauvageot H. Cloud-to-ground lightning activity in hail-bearing convective storms // Journal of Geophysical Research. – 2004. – 109 (D2). – P. D 2101.
16. Бейтуганов М.Н., Чочаев Х.Х. Предотвращение и прерывание града комбинированным методом «реагент плюс искусственно инициируемые молнии» // Тр. Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. – СПб., 2022. – Вып. 685. – С 19-27.
17. Бейтуганов М.Н. Метод предотвращения града инициированием искусственных молний // Сб. научных трудов 5 Российской конференции по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003. – Т. 1. – С. 204-207.
18. Бейтуганов М.Н., Чочаев Х.Х. Опыты по предотвращению града инициированием искусственных молний с помощью противоградовых ракет с токопроводящей поверхностью // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству: Сб. трудов. Нальчик 23-27 сентября 2019. – СПб., 2019. – С. 63-72.

19. Бейтуганов М.Н. Несмеянов П.А. Исследование возможности провоцирования электроразрядных явлений плазменными образованиями // Сб. трудов 6 Российской конференции по атмосферному электричеству. – Нижний Новгород, 2007. – С. 142-144.
20. Бейтуганов М.Н. Иницирование искусственных молний как метод предотвращения града // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2013. – № 1 (51). – С. 38-43.

REFERENCES

1. Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I. Fizicheskie i inzhenernye osnovy molniezashchity [Physical and engineering fundamentals of lightning protection]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1978, 202 p.
2. Petrov N.I., Petrova G.N. Fizicheskie mekhanizmy razvitiya molnievykh razryadov mezhdu grozovym oblakom i ionosferoy [Physical mechanisms of lightning discharges development between a thundercloud and the ionosphere], *ZhTF* [Journal of Technical Physics], 1999, Vol. 69, Issue 4, pp. 134-137.
3. Khorquani V.G. Mikrofizika zarozhdeniya i rosta grada [Microphysics of hail origin and growth]. Moscow: Gidrometeoizdat, 1984, 184 p.
4. Blevins L.L., Marwitz J.D. Visual observations of lightning in Some Great Plains hailstorms, *Weather*, 1968, 23, pp. 192-194.
5. Branick M.L., and Deswell C.A. III. An observation of the relationship between supercell structure and lightning ground strike polarity, *Weather Forecast*, 1992, 7, pp. 143-149.
6. Carey L.D., and Rutledge S.A. Electrical and multiparameter Radar observations of a severe hailstorm, *J. Geophys. Res.*, 1998, 103, pp. 13,979-14,000.
7. Williams E.R., et al. The behavior of total lightning activity in Severe Florida thunderstorms, *J Atmos. Res.*, 1999, 51, pp. 245-264.
8. Proctor D.E. Lightning and precipitation in Small Multicellular Thunderstorm, *J. Geophys. Res.*, 1983, Vol. 88, n. C9, pp. 5421-5440.
9. Proctor D.E. Radar Observations of Lightning, *J. Geophys. Res.*, 1981, Vol. 86, C12, pp. 12109-12114.
10. Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., M. Hayakawa M. Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds, *Climate and Atmospheric Science*, 2019, pp. 1-10.
11. Beytuganov M.N. Elektricheskie razryady razlichnykh tipov i molnii kak prichina prevrashcheniya chastits mikroprimesi atmosfery v zarodyshi grada [Electrical discharges of various types and lightning as the cause of the transformation of atmospheric microparticles into hail nuclei], *Doklady Vserossiyskoy konferentsii po fizike oblakov i aktivnym vozdeystviyam na gidrometeorologicheskie protsessy: Sb. nauchnykh trudov* [Reports of the All-Russian Conference on Cloud Physics and Active Influences on Hydrometeorological Processes. Collection of Scientific Papers]. Part 2. Nal'chik, 2017, pp. 249-256.
12. Rayst P. Aerozoli. Vvedenie v teoriyu [Aerosols. Introduction to the theory]. Moscow: Mir, 1987, 277 p.
13. Distler G.I. Kobzeva S.A. Dal'nodeystvie aktivnykh tsentrov kristallicheskikh poverkhnostey [Long-Range action of active centers of crystalline surfaces], *DAN SSSR* [Proceedings of the Academy of Sciences of USSR], 1967, Vol. 172, No. 5, pp. 1069-1071.
14. Meddaliev Kh.Kh., Sizhazhev S.M. Izucheniye stepeni grozopasnosti oblakov i opredelenii vremeni i mesta vzniknoveniya kanala molnii [Study of the degree of thunderstorm danger of clouds and determination of the time and place of the lightning channel occurrence], *Tr. Vysokogornogo geofizicheskogo instituta. Vyp. 29. Fizika oblakov i aktivnykh vozdeystviy na gradovye protsessy* [Proceedings of the High-Mountain Geophysical Institute. Issue 29. Physics of clouds and active influences on hail processes]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975, pp. 3-11.
15. Soula S., Seity Y., Féral L., Sauvageot H. Cloud-to-ground lightning activity in hail-bearing convective storms, *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109 (D2), pp. D 2101.
16. Beytuganov M.N., Chochaev Kh.Kh. Predotvrashchenie i preryvanie grada kombinirovannym metodom «reagent plus искусственно инициируемые молнии» [Prevention and interruption of hail by the combined method of "reagent plus artificially initiated lightning"], *Tr. Voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhayskogo. Problemy voenno-prikladnoy geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoy sredy* [Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky. Problems of Military Applied Geophysics and Control of the Natural Environment]. St. Petersburg, 2022, Issue 685, pp 19-27.
17. Beytuganov M.N. Metod predotvrashcheniya grada iniciirovaniem iskusstvennykh molnii [The method of preventing hail by initiating artificial lightning], *Sb. nauchnykh trudov 5 Rossiyskoy konferentsii po atmosfernomu elektrichestvu* [Collection of scientific papers of the 5th Russian Conference on Atmospheric Electricity]. Vladimir, 2003, Vol. 1, pp. 204-207.
18. Beytuganov M.N., Chochaev Kh.Kh. Opyty po predotvrashcheniyu grada iniciirovaniem iskusstvennykh molnii s pomoshch'yu protivogradovykh raket s tokoprovodyashchey poverkhnost'yu [Experiments on preventing hail by initiating artificial lightning using anti-hail rockets with a conductive surface], *VII Vserossiyskaya konferentsiya po atmosfernomu elektrichestvu: Sb. trudov. Nal'chik 23-27 sentyabrya 2019* [VII All-Russian Conference on Atmospheric Electricity. Collection of papers. Nalchik, September 23-27, 2019]. St. Petersburg, 2019, pp. 63-72.

19. *Beytuganov M.N. Nesmeyanov P.A. Issledovanie vozmozhnosti provotsirovaniya elektrorazryadnykh yavleniy plazmennymi obrazovaniyami* [Research on the possibility of provoking electric discharge phenomena by plasma formations], *Sb. trudov 6 Rossiyskoy konferentsii po atmosfernomu elektrichestvu* [Collection of papers of the 6th Russian Conference on Atmospheric Electricity]. Nizhniy Novgorod, 2007, pp. 142-144.
20. *Beytuganov M.N. Initsirovanie iskusstvennykh molniy kak metod predotvrashcheniya grada* [Initiation of artificial lightning as a method of preventing hail], *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, No. 1 (51), pp. 38-43.

Бейтуганов Мусаби Ногманович – Северо-Кавказская военизированная служба, Росгидромет; e-mail: bmn3112m@mail.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79289104874; начальник отдела активных воздействий СКВС; д.ф.-м.н.

Чочаев Хизир Хусейнович – Северо-Кавказская военизированная служба, Росгидромет; e-mail: gradskvs@rambler.ru; г. Нальчик, Россия; тел.: +79280819577; начальник Службы; к.ф.-м.н.

Beituganov Musabi Nogmanovich – North Caucasian Paramilitary Service, Roshydromet; e-mail: bmn3112m@mail.ru; Nalchik, Russia; phone: +79289104874; head of the Department of Active Effects of the CFS; dr. of phys. and math. sc.

Chochaev Khizir Huseynovich – North Caucasian Paramilitary Service, Roshydromet; e-mail: gradskvs@rambler.ru; Nalchik, Russia; phone: +79280819577; head of Service; cand. of phys. and math. sc.

УДК 551.594.1

DOI 10.18522/2311-3103-2026-4-180-190

О.В. Белоусова

ГЛОБАЛЬНЫЕ И ЛОКАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ ЭЛЕКТРОДНОМ СЛОЕ

Представлена математическая модель структуры приземного электродного слоя атмосферы, учитывающая совместное действие глобальных и локальных генераторов электрического поля. Пространственно-временное моделирование основано на сопряжении гармонических тригонометрических функций суточного хода для локального турбулентного обмена и для плотности глобального полного тока. При моделировании поведения электрического поля использованы аналитические решения уравнений электродного эффекта в атмосфере. Предложенный подход заключается в пошаговой подстановке мгновенных значений плотности полного электрического тока и коэффициента турбулентной диффузии, полученных из уравнений их периодического изменения для конкретного часа суток, в аналитические формулы стационарного пространственного распределения характеристик турбулентного электродного слоя. Правомочность использования квазистационарного приближения строго обоснована существенным различием (более чем на два порядка) временных масштабов установления электрического равновесия среды и периода суточного хода глобального токового генератора. Установлено, что совмещенный режим моделирования адекватно воспроизводит синергетическое расширение размаха суточной кривой напряжённости (градиента потенциала) электрического поля и деформацию его профиля, характерную для летнего сезона в высокогорье. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждена путем их сравнения с экспериментальными данными натурных измерений на высокогорной станции Пик Чегет (43° 16' с. ш. и 42° 30' в. д.), расположенной в Приэльбрусье на высоте 3040 м н. у. м. Анализ продемонстрировал хорошее количественное и хронологическое соответствие значений расчетных экстремумов наблюдаемой суточной вариации напряжённости электрического поля в летний сезон. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы для повышения точности интерпретации данных геофизического мониторинга.

Математическое моделирование; приземный слой, атмосфера; электродный эффект; электрическое поле; аэроионы, ионизация; суточный ход.