

УДК 551.509

КОРОННЫЙ РАЗРЯД В ОБЛАКАХ

А. А. Синькевич, Ю. А. Довгалюк

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, г. Санкт-Петербург, Россия

Представлен обзор результатов теоретических исследований и лабораторного моделирования возникновения коронных разрядов в облаках. Анализируется их влияние на эволюцию микроструктуры облака и его электризацию. Показано, что коронные разряды появляются при сближении крупных гидрометеоров, а в отдельных случаях возможен коронный разряд с кристаллов, крупы и града. Коронные разряды приводят к значительной ионизации воздуха, зарядке облачных частиц, разделению зарядов в облаках и инициируют стримеры и молнии. Анализируется влияние коронных разрядов на изменение фазового состава облаков.

ВВЕДЕНИЕ

Электризация облаков обусловлена действием многих механизмов зарядки облачных частиц: диффузионного, индукционного, контактного и связанных с фазовыми переходами и дроблением облачных частиц, в том числе коронными разрядами.

Коронный разряд в облаках может возникать при сближении заряженных частиц, а также в сильном электрическом поле около отдельных частиц. Анализ литературы, посвящённой коронному разряду в облаках, показал, что его исследования были направлены на решение следующих задач.

- 1) Исследование условий, при которых возникает коронный разряд в облаках.
- 2) Оценка частоты появления коронных разрядов в облаках.
- 3) Определение скорости ионообразования в облаках при коронных разрядах и характеристик процессов зарядки гидрометеоров.
- 4) Определение тока коронного разряда и радиоизлучения облака.
- 5) Влияние коронного разряда на преобразования микрофизических характеристик облака.
- 6) Изучение роли коронного разряда в формировании стримеров и инициации молний.

Наибольший вклад в исследования коронных разрядов, которые могут наблюдаться в облаках, внесли лабораторные эксперименты. Достаточно много работ связано с теоретическими исследованиями и численным моделированием тех или иных процессов. Полностью отсутствуют исследования этих процессов в натурных условиях, что обусловлено сложностью проведения такого рода экспериментов.

Коронный разряд как явление хорошо известен и изучен в физике [1]. Это слабосветящийся разряд, который появляется в окрестности острия, где отмечается резкое усиление электрического поля. Коронный разряд предшествует пробое. Когда приложенное напряжение меньше напряжения зажигания короны, в цепи регистрируется несамостоятельный ток порядка 10^{-14} А. Он обусловлен вытягиванием ионов, имеющихся в воздухе. Зажигание короны проявляется в виде свечения около коронирующего электрода и скачкообразного возрастания тока примерно до 1 мкА при нормальном давлении в приземном слое атмосферы [2]. Сила тока также зависит и от характеристик электродов.

Целью настоящей статьи является краткий обзор работ по изучению коронного разряда, который может наблюдаться в облаках. В статье также будут представлены результаты исследований по этой тематике, проведённых учёными Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова и авторами настоящей статьи.

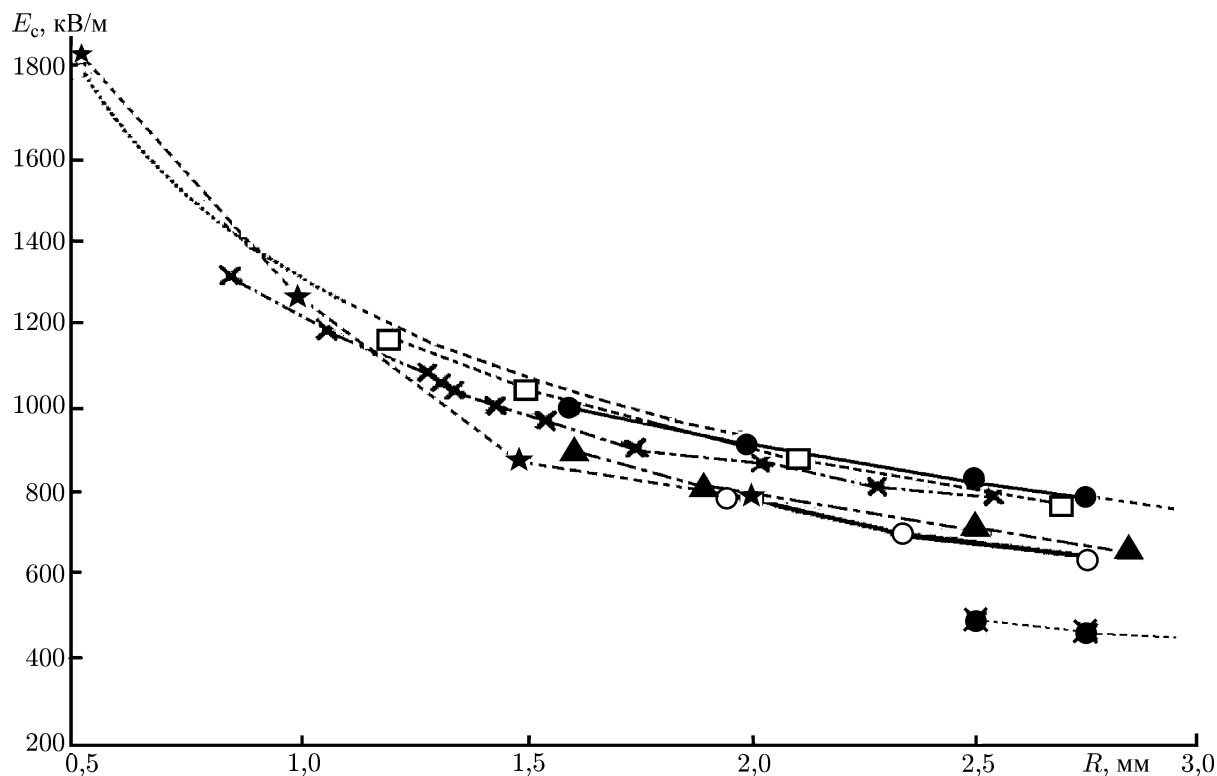


Рис. 1. Критическая напряжённость электрического поля, приводящая к коронному разряду, в зависимости от радиуса капель по данным разных исследователей: символы $\square$ соответствуют данным [11], $\times$ — [12], $\circ$ — [14], $\blacktriangle$ — [15], $\star$ — [19], $\bullet$ — [21], пунктирная линия без символов соответствует данным [24], $\star$ — [28]

1. УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА В ОБЛАКАХ

Большой цикл исследований посвящён процессам возникновения коронного разряда в зависимости от размеров облачных частиц, их фазового состава и напряжённости электрического поля [3–24].

Нолан [21] провёл одно из первых исследований соотношения между размерами частиц и напряжённостью электрического поля, необходимого для возникновения коронного разряда для капель с радиусом от 1 до 2,1 мм. Было установлено, что критическая напряжённость E_c связана с радиусом капли R и поверхностным натяжением S следующим образом:

$$E_c [\text{ед. СГС}] = C_1 (S [\text{дин/см}]/R [\text{см}])^{1/2}, \quad (1)$$

где $C_1 = 1,5$.

В последующие годы вопрос о критической напряжённости поля был предметом многочисленных исследований. В частности, как в теоретических работах, так и в лабораторных экспериментах уточнялся коэффициент C_1 . Было подтверждено, что критическое поле уменьшается с увеличением размера частиц. Результаты ряда экспериментов представлены на рис. 1. Для возникновения коронного разряда требуются значительные электрические поля (см. рис. 1), а напряжённость электрического поля внутри облаков не может превышать 400–500 кВ/м, поэтому был сделан вывод о малой вероятности возникновения коронного разряда в облаках с отдельных капель.

Если есть острые грани, что характерно для кристаллов, коронный разряд развивается с более

заострённого конца в сравнительно умеренных полях $400 \div 500$ кВ/м [12, 16–18]. Авторы [16–18] указывают на отсутствие разрядов в облаках с тонких ледяных кристаллов — игл и пластинок — из-за их очень низкой поверхностной проводимости. Поэтому только крупные частицы, такие, как крупа и град, могут создавать разряды в облаках [8, 10].

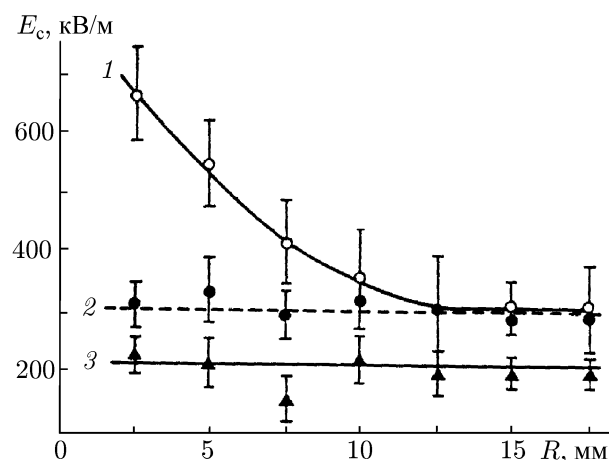


Рис. 2. Зависимость критической напряжённости электрического поля E_c возникновения коронного разряда с тающих градин от их радиуса R при разной ориентации электрического поля [6]: кривая 1 отвечает горизонтальному электрическому полю, 2 — вертикальному отрицательному электрическому полю, 3 — вертикальному положительному электрическому полю

Известно, что в областях «мокрого роста» и таяния градина покрывается водяной оболочкой, часть которой срывается в виде капель и струек. Для таких частиц в грозовых облаках можно ожидать уменьшения критической напряжённости электрического поля. Этот эффект был исследован авторами [6], а также [3–5]. Как видно из рис. 2, критическая напряжённость не зависит от радиуса тающих градин в пределах $2,5 \div 17,5$ мм. При отрицательном знаке поля напряжённость E_c примерно на 100 кВ/м выше, чем при положительном, для которого оно равно 200 кВ/м. При горизонтальной ориентации поля напряжённость E_c существенно выше, чем при вертикальной для $R = 2,5 \div 7,5$ мм и близко к случаю вертикального отрицательного поля при больших радиусах градин.

1.1. Влияние давления (высоты) на возникновение коронного разряда

Условия для возникновения коронного разряда в атмосфере улучшаются с уменьшением давления, т. к. увеличивается длина свободного пробега электронов.

Доусон [25] выполнил одно из первых исследований влияния давления на коронный разряд с водяной поверхности различной кривизны. Согласно его данным напряжённость E_c уменьшается с падением давления начиная с величины последнего, соответствующей высоте 4,5 км для положительно заряженной поверхности и высоте 7 км — для отрицательно заряженной поверхности. По его данным крупные капли являются более предпочтительными источниками коронного разряда, чем мелкие. Однако в рассмотренных выше экспериментах критическое поле очень велико, так что при реально существующем электрическом поле в облаках маловероятно ожидать коронирования с отдельных крупных капель.

Теоретические расчёты напряжённости E_c в зависимости от давления показывают, что горизонтально ориентированное критическое электрическое поле заметно меньше, чем вертикальное, может составлять 290 кВ/м на высоте 7,4 км для заряженных капель с радиусом 2 мм и уменьшается до 110 кВ/м на высоте 10 км [26].

Гриффитс и др. [16–18, 27] теоретическим путём на основе решения уравнений баланса для ионов подтвердили полученный выше результат. Исследуя экспериментально коронный разряд с ледяных кристаллов разной формы (иглы, призмы, пластинки, градины), они показали, что критическое поле увеличивается с ростом давления со скоростью $240 \div 1000$ В/м/мбар в диапазоне $200 \div 900$ мбар. Для типичного распределения температуры и давления в грозовом облаке коронный разряд с градин инициируется при $E_c = 720$ кВ/м на высоте $H = 2,5$ км (при давлении

Таблица 1. Измеренные относительные значения доли столкнувшихся капель в процентах, при которых наблюдается коронный разряд, для трёх типов взаимодействия (А, В, С) как функции напряжённости электрического поля E и относительной скорости движения V взаимодействующих частиц [35]

Тип взаимодействия	V , м/с	E , кВ/м									
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
А	2	0	0	0	20	40	55	70	85	80	100
А	4	0	0	5	15	30	50	65	80	75	100
А	6	0	5	10	20	45	65	80	90	90	100
А	8	0	0	0	15	35	50	75	75	80	100
В	6	0	10	50	20	55	70	80	95	100	100
С	4	0	15	5	30	50	75	65	85	80	90

$P = 750$ мбар) и при $E_c = 540$ кВ/м на высоте $H = 5,5$ км ($P = 500$ мбар). Соответствующие значения для снежинок составляют 540 и 390 кВ/м. Для кристаллов напряжённость $E_c = 900$ кВ/м при давлении 1000 мбар и уменьшается до 550 кВ/м при давлении 500 мбар.

Зависимость критической напряжённости электрического поля от высоты была вычислена Коквилатом и Чаузи [28]. За основу они взяли данные Доусона. Они установили, что напряжённость E_c заметно уменьшается с ростом зарядов капель. В отличие от результатов Доусона, они показали, что коронный разряд может наблюдаться на меньших высотах. Результаты их исследований привели к выводу, что коронный разряд (положительная корона) в реальных условиях может происходить с крупных капель, имеющих очень большой заряд Q , например $Q = 330$ пКл для $R = 0,5$ мм и $H = 2,5$ км.

1.2. Роль взаимодействия частиц в формировании коронного разряда

При соударении (сближении) капель разряд происходит при меньшей напряжённости электрического поля, чем для случаев невзаимодействующих частиц. Как указывают Сартор и Аткинсон [29, 30], при сближении равных по размеру противоположно заряженных сфер до расстояния, равного 10^{-1} их радиуса, напряжённость поля на их поверхностях возрастает в 14 раз по сравнению со случаем, когда заряды распределены по сферам равномерно, при расстоянии 10^{-2} радиуса — в 92 раза, при расстоянии 10^{-3} радиуса — в 690 раз и при расстоянии 10^{-4} радиуса — в 5600 раз.

Согласно Дячуку [31, 32] при слиянии двух капель с радиусом 1,25 мм и напряжённости поля $E_c = 700$ кВ/м наблюдается разряд с поверхности вновь образованной капли. В то же время для возникновения разряда с одной такой капли требуется напряжённость поля $E_c = 1100$ кВ/м.

Крэб, Лэзем и Стромберг [33, 34] исследовали столкновения капель, сопровождающиеся их слиянием. Капли имели радиусы 2,70 и 0,65 мм, их заряд был незначителен. При взаимодействии капель наблюдалось возникновение жидкой водяной перемычки между ними. Её длина составляла несколько радиусов сталкивающихся капель. Между каплями возникал коронный разряд при полях 250–500 кВ/м. Переносимый заряд составлял 100 пКл. Столь низкая напряжённость поля, при котором возникает коронный разряд, свидетельствуют о том, что данный процесс может наблюдаться в облаках на предгрозовой стадии.

Блиф и др. [35] выполнили эксперименты по определению напряжённости поля, при котором возникает коронный разряд при взаимодействии капля–капля, $T > 0^\circ\text{C}$ (А); капля–капля, $T < 0^\circ\text{C}$ (В); капля–кристалл, $T < 0^\circ\text{C}$ (С). Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Показано, что для всех видов взаимодействия коронный разряд наблюдался, начиная с на-

пряжённости поля 250 кВ/м. При напряжённости поля в 350 кВ/м коронный разряд возникал в 50-и и более процентах случаев. Критическая напряжённость зависит от относительной скорости движения взаимодействующих капель более сложно, что требует дальнейшего исследования.

1.3. Роль зарядов гидрометеоров в формировании коронного разряда

Естественно предположить, что наличие зарядов на каплях и кристаллах должно приводить к уменьшению критической напряжённости электрического поля, необходимого для стимулирования коронного разряда.

Ричардс и Доусон [23] по результатам лабораторных экспериментов показали, что напряжённость E_c зависит от заряда капель. Так, в случае сильно заряженных капель с радиусом $R = 3$ мм величина $E_c = 550$ кВ/м, а соответствующая критическая напряжённость поля для незаряженных капель составляет 900 кВ/м.

Аббас и Лэзем [36] оценили зависимость критической напряжённости поля от заряда капли и установили, что с увеличением последнего критическая напряжённость уменьшается. Данные измерений позволили получить корреляционную связь между напряжённостью поля, радиусом капель и их зарядом в виде

$$E_c [\text{ед. СГС}] = (R [\text{см}])^{-1/2} (13,6 - 8 |q [\text{ед. СГС}]|). \quad (2)$$

Миллер и др. [37], Сартор и Аткинсон [29] экспериментально изучали коронный разряд между сближающимися каплями, несущими заряды противоположных знаков. В опытах [29] капли имели радиус 0,08 мм и заряды 0,021 эл.-ст.ед. При падении пар капель друг за другом по сближающимся траекториям коронный разряд в горизонтальном электрическом поле наблюдался не только у непосредственно сблизившихся капель, но и у смежных пар капель, отстоящих друг от друга и от соседней пары на расстоянии в несколько диаметров.

Коквилат и Чаузи [28] показали, что только для больших зарядов капель возможно возникновение коронного разряда в реальных условиях. Так, например, на высоте 6 км коронный разряд может происходить с капель, несущих заряд 310 пКл и имеющих диаметр 1 мм, а также несущих заряд 710 пКл и имеющих диаметр 2,5 мм. Авторы работы [28] делают вывод, что при определённых условиях возможно возникновение коронного разряда и с отдельных частиц (капель). При этом, как и следовало ожидать, в случае положительной короны критические поля оказываются заметно меньше, чем в случае отрицательной короны.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЧАСТОТЫ ПОЯВЛЕНИЯ КОРОННЫХ РАЗРЯДОВ В ОБЛАКАХ

Вопрос о частоте коронных разрядов в облаках является важнейшим для оценки их роли в формировании электрической структуры облака и его микроструктуры. Однако этому вопросу посвящено очень мало исследований. До настоящего времени отсутствуют оценки интенсивности коронных разрядов в облаках с отдельных частиц (крупных капель, кристаллов) при наличии на них существенных электрических зарядов. Имеются лишь оценки частоты появления коронного разряда в случае сближения крупных капель осадков [38]. Шишкин [38] использовал простую численную модель облака и полагал, что каждое соударение крупных гидрометеоров (частиц осадков) приводит к разряду. В результате он рассчитал частоту появления коронных разрядов в облаке. Им было показано, что при интенсивности осадков в облаке $I = 10$ мм/ч следует ожидать, что частота соударений крупных частиц друг с другом (и соответственно частота разрядов) в единице объёма будет равна $10 \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Можно предположить, что коронный разряд

будет происходить не только при соударениях, но и при сближении частиц осадков. Этот вопрос был рассмотрен позднее в работах Сталевич и Учеваткиной [39, 40] и Шишкина [41]. Они оценивали число сближений W при разных расстояниях между падающими частицами осадков. При малой интенсивности осадков $I = 0,5$ мм/ч значение W для мелких частиц осадков с радиусом $R = 0,2$ мм в 10^{30} раз больше величины W для крупных частиц с $R = 4 \div 5$ мм, а при большой интенсивности $I = 100$ мм/ч — примерно в 10^{18} раз. Отсюда следует весьма важная задача для дальнейших лабораторных исследований: необходимо определить тот минимальный размер частиц осадков, начиная с которого при сближении капель следует ожидать коронный разряд. Значимость этой задачи связана с тем, что частота разрядов, а следовательно и роль рассматриваемого явления в формировании электрической и микрофизической структуры облака самым существенным образом зависит от размеров частиц, при сближении которых отмечается коронный разряд.

3. СКОРОСТЬ ИОНООБРАЗОВАНИЯ В ОБЛАКАХ ПРИ КОРОННЫХ РАЗРЯДАХ И ЗАРЯДКА ГИДРОМЕТЕОРОВ

Известно, что скорость ионообразования составляет 10 пар ионов в кубическом сантиметре в секунду. В области коронного разряда следует ожидать значительного роста этой величины. Шишкин [38] оценил скорость ионообразования в облаке вследствие коронных разрядов между падающими крупными частицами осадков. Для этого он проанализировал опыты Сартора и Аткинсона [29], которые изучали возникновение коронного разряда в горизонтальном электрическом поле между падающими каплями, имеющими заряды $\pm 0,21$ ед. СГС и радиус 0,08 мм. Потенциальная энергия каждой такой капли равна

$$e\varphi = eq/R = 1,6 \cdot 10^{12} \text{ эВ.} \quad (3)$$

Известно, что для большинства атмосферных газов потенциал ионизации находится в пределах от 11 до 20 эВ. Полагая, что вся энергия сблизившихся капель затрачивается на ионизацию (при этом в пространстве около капли может возникнуть около 10^{11} пар ионов), Шишкин оценил степень ионизации грозового облака вследствие наличия коронных разрядов. Он рассматривал грозовое облако, в котором радиус капель (или зародышей града) составлял $0,6 \div 0,8$ мм, а интенсивность осадков внутри облака равнялась 10 мм/час при концентрации частиц $3,5 \text{ л}^{-1}$. Он подсчитал, что частота соударений частиц друг с другом в единице объема составляет примерно $10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Если полагать, что каждое сближение частиц приводит к коронному разряду, то для скорости ионообразования получается величина $10^7 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, которая на 6 порядков больше, чем без коронного разряда.

Учитывая, что коронный разряд приводит к сильной локальной ионизации облачной среды, при его наличии следует ожидать интенсивную зарядку капель и кристаллов. Экспериментальные исследования этого эффекта были выполнены Шишкиным и Першиной [42–44]. В работе [45] исследована зарядка капель тумана в поле коронного разряда между крупными каплями. Водность тумана составляла 1 г/м^3 . Было показано, что при продолжительном поддержании короны суммарный заряд капель тумана за время менее минуты может достигать в среднем 7 Кл/км^3 . Наблюдался преимущественно отрицательный заряд капель тумана.

Аналогичные эксперименты [42] были проведены и для кристаллического тумана. Было установлено, что имеет место в основном отрицательное заряджение тумана. Суммарный заряд кристаллов в опытах достигал $8 \div 15 \text{ Кл/км}^3$.

В работе Шишкина [38] приведены результаты теоретических исследований роста зарядов на каплях облака вследствие коронного разряда с крупных частиц (частиц осадков). Он выпол-

нил модельные расчёты роста заряда облачных капель за счёт адсорбции ионов при скорости ионообразования $10^4 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Увеличение последней приводит к резкому возрастанию скорости зарядки капель. Уже за первые 30 с капли приобретают заряд порядка $100 \div 200$ элементарных зарядов. Показано, что для облака с интенсивностью осадков 10 мм/ч напряжённость поля за счёт коронного разряда может достигать нескольких тысяч вольт на сантиметр.

Зарядка кристаллов в результате их коронирования во внешнем электрическом поле была измерена Гриффитсом [46]. Он изучал зарядку кристаллов разных форм: гексогональных пластинок, столбиков, дендритов и крупы. Размеры кристаллов были достаточно велики и составляли $5 \div 10$ мм. В зависимости от полярности внешнего поля кристаллы заряжались либо положительно, либо отрицательно. В результате коронного разряда они приобретали весьма значительный заряд, который был равен $0,1 \div 0,5$ нКл.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что данный механизм электризации весьма интенсивен и может, наряду с другими, создавать условия, необходимые для появления стримеров, дающих начало грозовому разряду.

4. ТОК КОРОННОГО РАЗРЯДА С ГИДРОМЕТЕОРОВ И РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ОБЛАКА

Краб и Лэзем [33] измерили параметры импульсов тока, возникающих между взаимодействующими каплями во внешнем электрическом поле. Коронный разряд наблюдался при столкновении капель с радиусами 2,70 и 0,65 мм, движущимися относительно друг друга со скоростью 5,8 м/с. Было установлено, что в случае коронного разряда наблюдаются $4 \div 10$ импульсов тока, причём каждый из них переносит заряд примерно 10^{-10} Кл.

Чаузи и Кэбли [47] моделировали коронный разряд между облачными частицами. Результаты их исследований показали, что длительность импульса тока и его амплитуда зависят от расстояния между частицами, при котором наблюдается разряд. Обычно при уменьшении расстояния между коронирующими частицами импульс укорачивается, а его амплитуда увеличивается. Характерная длительность импульса находилась в пределах $5 \div 20$ нс. Важно также подчеркнуть короткий передний фронт импульсов с длительностью $1 \div 2$ нс, которая обеспечивает широкий спектр генерируемого ими радиоизлучения. Для исследования радиоизлучения коронный разряд моделировался микроразрядом между двумя проводниками: сфера—сфера и сфера—игла, которые имитировали гидрометеоры. Такая имитация не совсем оправдана, т. к. характеристики коронного разряда отличаются от характеристик электрического пробоя. Однако авторы выполнили несколько экспериментов с коронным разрядом с капель, одновременно указывая на сложность измерений из-за малой интенсивности радиоизлучения. Максимум спектральной плотности энергии излучения находился в диапазоне $10^7 \div 10^9$ Гц, при этом длительность импульсов составляла $2 \div 3$ нс. Амплитуда импульса была весьма значительна и равна 50 мА, что существенно превышает аналогичные величины в природных условиях.

В сильном электрическом поле в кучево-дождевых облаках возможен коронный разряд с отдельных кристаллов, и поэтому интересна оценка соответствующей силы тока. Гриффитс и Лэзем [16] измерили ток коронного разряда с кристаллов разного размера. Ток составляет 10^{-7} А, что близко к пороговому значению зажигания разряда. При этом сила тока не зависит от давления, размера исследуемого кристалла, но увеличивается с ростом внешнего поля.

Коквилат и др. [48] определили параметры коронного разряда между кристаллами, а точнее моделями кристаллов. Эти параметры зависят от температуры воздуха. Для температуры выше пороговой, $T_{\text{П}} = -18^\circ \text{С}$ [18], вследствие увеличения проводимости льда и формирования квазжидкой плёнки, наблюдается более сильный ток разряда, который близок к току разряда капель.

Длительность импульсов составляла несколько десятков наносекунд.

Дячук и Мучник [6] измерили длительность импульса коронного разряда с тающих градин и получили, что она равна 10^{-2} с при силе тока 10^{-6} А. Переносимый заряд составил порядка 10^{-8} Кл. Таким образом, в зависимости от объекта разряда и условий экспериментов параметры импульсов тока существенно различны.

5. РОЛЬ КОРОННОГО РАЗРЯДА В ИЗМЕНЕНИИ МАССЫ КАПЕЛЬ, ФАЗОВОГО СОСТАВА ОБЛАКОВ И ФОРМИРОВАНИЯ СТРИМЕРОВ

Коронный разряд капли может сопровождаться вылетом из неё мелких капель и, соответственно, потерей массы капли. Как обнаружил Макки [20], потеря массы за время 0,05 с возрастает с увеличением радиуса капель и с ростом напряжённости электрического поля. Оказалось, что потеря массы капли существенно больше при вылете из неё положительно заряженных мелких капелек по сравнению с вылетом отрицательно заряженных мелких капелек. По нашему мнению, такие процессы могут приводить к преимущественно отрицательному заряду крупных капель.

Лэзем [49] исследовал потерю массы каплями с радиусом 1,91 мм при коронном разряде с них в зависимости от напряжённости поля. Оказалось, что увеличение напряжённости поля свыше 850 кВ/м приводит к быстрому росту потери массы капель. Согласно Матьюсу [50], для капель с радиусом 2,15 и 2,8 мм потеря массы зависит от времени экспозиции (т. е. времени приложения напряжения) только для величины последнего менее 0,3 с. При экспозиции 0,3 с капля с радиусом 2,8 мм теряет около 60 % своей первоначальной массы при напряжённости поля 790 кВ/м. Аббас и Лэзем [51] выполнили исследования с каплями с радиусом от 20 до 200 мкм. Они показали, что при коронном разряде при каждом выбросе мелких капель, кроме массы, крупная капля теряет порядка 25 % заряда. При этом выброс наблюдается из верхней части капли.

Таким образом, результаты лабораторных экспериментов показали, что капли теряют массу в сильном электрическом поле. Согласно современным представлениям, критическая напряжённость поля не может быть более $400 \div 500$ кВ/м, поэтому следует считать, что процессы, связанные с потерей массы одиночными каплями, в облаках маловероятны. Они могут происходить лишь для взаимодействующих капель, а также для капель, находящихся вблизи канала молнии или вблизи стримеров.

Сильное электрическое поле также влияет на температуру замерзания капель. В Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова выполнен цикл лабораторных экспериментов по изучению замерзания капель в области коронного разряда [52–56]. Вблизи частиц с коронным разрядом помещалась капля дистиллированной воды с радиусом $0,5 \div 0,7$ мм. Затем капля охлаждалась. В отсутствие разряда средняя температура замерзания капель составляла $-(16 \div 18)^\circ\text{C}$. При наличии коронного разряда капли замерзали при более высокой температуре вплоть до $-(3 \div 5)^\circ\text{C}$. По мере удаления капель от частиц с разрядом или увеличения расстояния между последними температура замерзания понижается. Температура замерзания капель зависит и от вида прикладываемого напряжения. Причём её наибольшее понижение наблюдается при использовании переменного напряжения для формирования коронных разрядов.

Важное физическое явление при коронном разряде с кристаллов было обнаружено Мэнделом и Кумаром [57], а также Байли и др. [12]: после прекращения коронного разряда происходит интенсивный рост игольчатых кристаллов на частице (рис. 3). При этом вновь образовавшиеся игольчатые кристаллы растут почти в 4 раза быстрее таких кристаллов при обычных условиях. Далее кристалл разрушался, а вновь образовавшиеся игольчатые кристаллы становились новыми центрами роста.

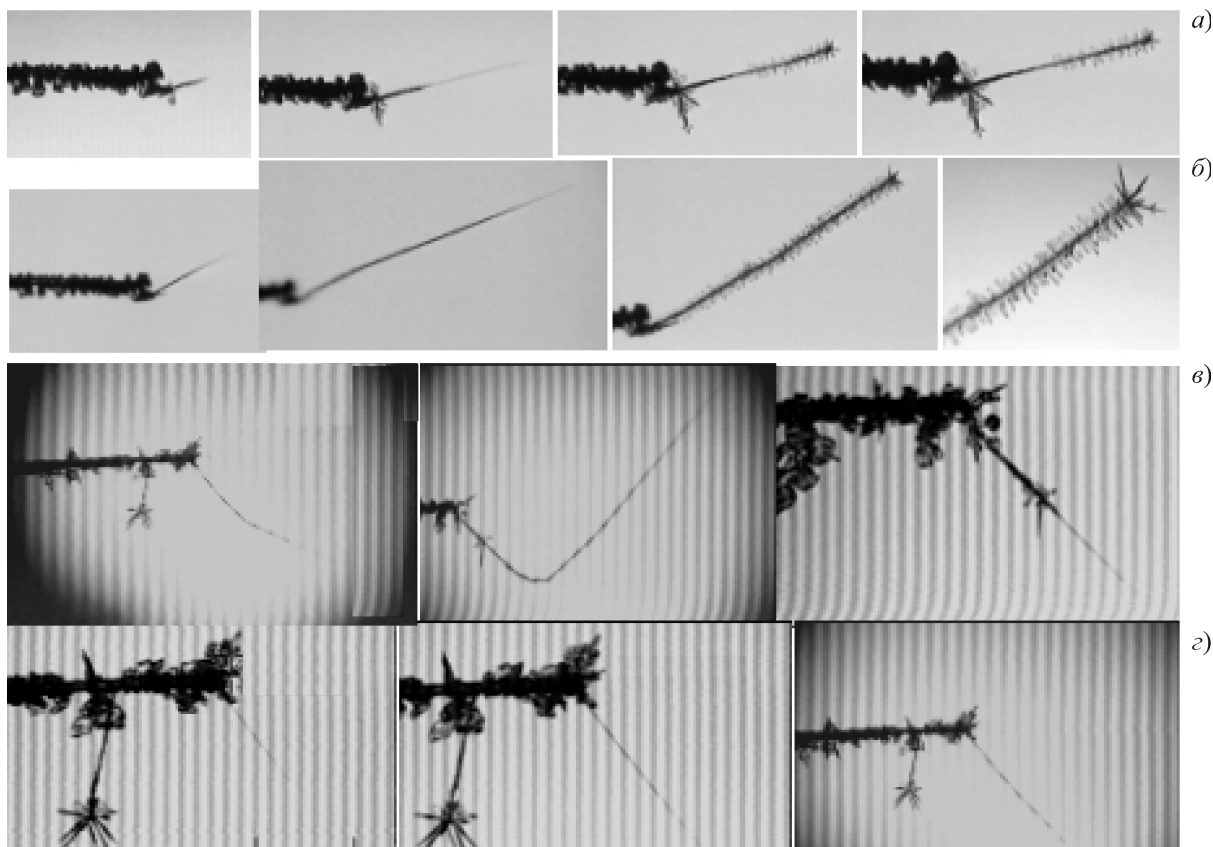


Рис. 3. Фотографии возникновения и роста игольчатых кристаллов после прекращения коронного разряда с основного (материнского) кристалла [12]

Таким образом, наблюдался процесс размножения кристаллов, который может оказаться одним из важнейших факторов, определяющих микроструктуру облака.

Ряд исследователей полагают, что коронные разряды могут инициировать стримеры и, в дальнейшем, молнии [58]. Коронный разряд представляет собой некоторый «спусковой механизм» для дальнейшего развития электрического разряда. Вопросам формирования и распространения стримеров посвящена обширная литература (см., например, [16, 28, 33, 59–64]).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведённый обзор исследований показал, что формирование грозовых облаков и их структура, наряду с изученными механизмами электризации облачных частиц, могут обуславливаться электрическими разрядами. В отдельных случаях при возрастании напряжённости электрического поля в облаках до величин, близких к пробойным, возможно коронирование с отдельных крупных гидрометеоров на больших высотах. Возможен также коронный разряд с падающих тающих градин при напряжённости электрического поля порядка 300 кВ/м.

Коронный разряд может наблюдаться при отсутствии значительных зарядов на гидрометеорах в результате сближения друг с другом этих частиц (крупных капель, а также капель и кристаллов) начиная с напряжённости электрического поля 250 кВ/м.

Наличие заряда на каплях снижает критическую напряжённость электрического поля, при которой начинается коронный разряд. Её величина связана с направлением (горизонтальным или

вертикальным) электрического поля. Однако нужны дополнительные данные, чтобы сделать вывод о количественной связи между зарядом на каплях и напряжённостью внешнего электрического поля, приводящего к появлению короны.

Частота коронных разрядов зависит от интенсивности осадков и становится существенной при её достаточно высоком значении (более 10 мм/ч). При этом скорость ионообразования в облаке возрастает на несколько порядков.

Анализ имеющихся данных показал, что коронные разряды в облаках могут оказывать важнейшее влияние на микрофизические и электрические характеристики облака, обеспечивая формирование гроз.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13–05–92697 ИНД_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов В. В. Ионизация в тропосфере. СПб.: Гидрометиздат, 1992. 311 с.
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 535 с.
3. Григорьев А. И. // Метеорология и гидрология. 1987. № 1. С. 69.
4. Григорьев А. И. // Письма в Журн. техн. физ. 1985. Т. 11, № 16. С. 1004.
5. Григорьев А. И., Синкевич О. А. // Письма в Журн. техн. физ. 1985. Т. 11, № 3. С. 182.
6. Дячук В. А., Мучник В. М. // Докл. АН СССР. 1979. Т. 248, № 1. С. 60.
7. Карелин А. В. // Вопросы электромеханики. 2010. № 118. С. 45.
8. Мучник В. М., Рудько Ю. С. // Тр. УкрНИГМИ. 1971. Вып. 103. С. 96.
9. Мучник В. М., Фишман Б. Е. Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. Л.: Гидрометиздат, 1982. 207 с.
10. Abbas M. A., Latham J., Reed R. L. // J. Met. Soc. Japan. 1976. V. 54, No. 2. P. 123.
11. Ausman E. L., Brook M. // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. P. 6131.
12. Bailey M., Hallett J., Petersen D., Beasley W. // Proc. 14th Int. Conf. Clouds and Precipitation, Bologna, 2004. V. 1. P. 986.
13. Boussaton M. P., Coquillat S., Chauzy S. // Proc. 12th Int. Conf. Atmospheric Electricity, Versailles, 2003. P. 271.
14. Coquillat S., Chauzy S., Georgis G. F., Combal B., Silvani X. // Proc. 11 ICAE, Guntersville, 1999. P. 320.
15. Georgis J. F., Coquillat S., Chauzy S. // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102, No. 14. P. 16793.
16. Griffiths R. F., Latham J. // Q. J. Roy. Met. Soc. 1974. V. 100, No. 424. P. 163.
17. Griffiths R. F., Latham J. // J. Met. Soc. Japan. 1972. V. 50, No. 5. P. 416.
18. Griffiths R. F., Latham J. // J. Met. Soc. Japan. 1974. V. 52, No. 3. P. 238.
19. Kamra A. K., Bhalwankar R. V., Sathe A. B. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 12901.
20. Macky W. A. // Proc. Roy. Soc. A. 1931. V. 133, No. 822. P. 565.
21. Nolan J. J. // Proc. Roy. Irish. Acad. A. 1926. V. 37. P. 28.
22. Phelps C. T. // J. Geophys. Res. 1971. V. 76, No. 24. P. 5799.
23. Richards C. N., Dawson Y. A. // J. Geophys. Res. 1971. V. 76, No. 15. P. 3445.
24. Taylor J. // Proc. Roy. Soc. A. 1964. V. 280, No. 1382. P. 383.
25. Dawson G. A. // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. P. 6859.
26. Coquillat S., Combal B., Chauzy S. // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108, No. 7. P. 4205.
27. Griffiths R. F., Latham J., Myers V. // Q. J. Roy. Met. Soc. 1974. V. 100, No. 424. P. 181.
28. Coquillat S., Chauzy S. // J. Geophys. Res. D. 1994. V. 99, No. 8. P. 16897.
29. Sartor J. D., Atkinson W. R. // Science. 1967. V. 157, No. 3794. P. 1267.

30. Sartor J. D. // J. Atm. Sci. 1967. V. 24, No. 6. P. 601.
31. Дячук В. А. // Тр. УкрНИГМИ. 1972. Вып. 114. С. 85.
32. Дячук В. А. // Тр. УкрНИГМИ. 1976. Вып. 144. С. 56.
33. Crabb J. A., Latham J. // Q. J. Roy. Met. Soc. 1974. V. 100, No. 424. P. 191.
34. Latham J., Stromberg I. M. // Physics of Lightning / Ed. by R. H. Golde. London: Academic Press, 1977. P. 99.
35. Blyth A. M., Christian H. J., Latham J. // J. Geophys. Res. D. 1998. V. 103, No. 12. P. 13 975.
36. Abbas M. A., Latham J. // Q. J. Roy. Met. Soc. 1969. V. 95, No. 403. P. 63.
37. Miller A. H., Shelden C. E., Atkinson W. R. // Phys. Fluids. 1965. V. 8, No. 11. P. 1 921.
38. Шишкин Н. С. // Тр. ГГО. 1971. Вып. 262. С. 94.
39. Сталевич Д. Д., Учеваткина Т. С. // Тр. Главной геофиз. обсерватории. 1979. Вып. 405. С. 33.
40. Сталевич Д. Д., Учеваткина Т. С. // Тр. Главной геофиз. обсерватории. 1979. Вып. 420. С. 3.
41. Шишкин Н. С. // Тр. Главной геофиз. обсерватории. 1983. Вып. 469. С. 3.
42. Першина Т. А., Шишкин Н. С. // Тр. Главной геофиз. обсерватории. 1976. Вып. 372. С. 23.
43. Першина Т. А., Шишкин Н. С. // Тр. Главной геофиз. обсерватории. 1977. Вып. 389. С. 47.
44. Шишкин Н. С., Першина Т. А. // Тр. Главной геофиз. обсерватории. 1973. Вып. 302. С. 55.
45. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 402 с.
46. Griffiths R. F. // J. Atm. Sci. 1976. V. 33, No. 8. P. 1 602.
47. Chauzy S., Kably K. // J. Geophys. Res. D. 1989. V. 94, No. 11. P. 13 107.
48. Coquillat S., Chauzy S., Medale J. C. // J. Geophys. Res. D. 1995. V. 100, No. 7. P. 14 327.
49. Latham J. // Q. J. Roy. Met. Soc. 1965. V. 91, No. 387. P. 87.
50. Matthews J. B. // J. Geophys. Res. 1967. V. 72, No. 12. P. 3 007.
51. Abbas M. A., Latham J. // J. Fluid. Mech. 1967. V. 30, No. 4. P. 663.
52. Башкирова Г. М., Першина Т. А., Шишкин Н. С. // Тр. Главной геофиз. обсерватории. 1979. Вып. 405. С. 71.
53. Довгалоук Ю. А., Пономарев Ю. Ф., Першина Т. А. и др. // Современ. исследования Гл. геофиз. обсерватории. Юбилейный сб. к 150-летию со дня основания. 1999. Т. 1. С. 270.
54. Степаненко В. Д., Довгалоук Ю. А., Синькевич А. А. и др. // Метеорология и гидрология. 2002. № 3. С. 39.
55. Синькевич А. А., Веремей Н. Е., Довгалоук Ю. А., Степаненко В. Д. Лабораторное моделирование коронного разряда в облаках. СПб.: Астерион, 2005. 62 с.
56. Синькевич А. А., Довгалоук Ю. А., Степаненко В. Д. // Вопросы физики облаков: Сб. статей. СПб.: Гидрометиздат, 2004. С. 109.
57. Mandal G., Kumar P. P. // Atm. Res. 2002. V. 61. P. 115.
58. Мучник В. М. Физика грозы. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 352 с.
59. Griffiths R. F., Phelps C. T. // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, No. 21. P. 3 071.
60. Иудин Д. И., Трахтенгерц В. Ю. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 36, № 5. С. 650.
61. Dawson, G. A., Winn W. P. // Zeit. fur Phys. 1965. V. 183. P. 159.
62. Marshall T. C., Winn W. P. // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 7 141.
63. Dawson, G. A., Winn W. P. // Zeit. fur Phys. 1965. V. 183. P. 159.
64. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 319 с.

Поступила в редакцию 16 апреля 2013 г.; принята в печать 27 декабря 2013 г.

CORONA DISCHARGE IN CLOUDS*A. A. Sin'kevich and Yu. A. Dovgaluk*

We present a review of the results of theoretical studies and laboratory modeling of corona discharge initiation in clouds. Their influence on the evolution of the cloud microstructure and cloud electrification is analyzed. It is shown that corona discharges are initiated, when large-sized hydrometeors approach each other, and in some cases, corona discharges can appear on crystals, pellets, and hailstones. They lead to significant air ionization, charging of cloud particles, separation of charges in clouds, and initiate streamers and lightning discharges. The influence of corona discharges on changes in the phase composition of clouds is analyzed.