

*Л. В. Кашлева, Ю. П. Михайловский, В. Ю. Михайловский*

## МЕХАНИЗМЫ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ОБЛАЧНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ

*L. V. Kashleva, Yu. P. Mikhailovskii, V. Yu. Mikhailovskii*

## CHARGING MECHANISMS OF HYDROMETEORS IN THUNDDERSTORM CLOUDS

Представлен обзор лабораторных исследований механизмов электризации частиц облака и осадков в кучево-дождевых облаках. Рассмотрены процессы заряжения частиц крупы и града: 1) при столкновении с ними облачных кристалликов; 2) при разрушении переохлажденных капель на их поверхности в результате взрывания или разбрызгивания капель. Показано, как действуют рассмотренные механизмы на различных стадиях развития. Предложена схема параметризации заряжения частиц для численного моделирования электризации облаков.

**Ключевые слова:** *грозовые облака, облачные заряды, электризация, гидрометеоры, ионы, ионная электризация, контактная электризация, крупа, град.*

The article presents the review of laboratory studies of charging mechanisms of cloud particles in thunderstorm. There're examined the graupel and the hail particles electrification in the result of 1) collision of cloud crystals with hail particles, 2) destruction of supercooled drops on hail in the result of their splashing or shattering on hail. The scheme of parameterization of particle charging for numerical simulation is suggested. There're shown how these mechanisms proceed in the various stages of cloud evolution.

**Keywords:** *thunderstorm clouds, cloud charges, electrification, hydrometeors, ions, ionic electrification, contact electrification, graupel, hailstone.*

### Введение

Природа электризации грозовых облаков в течение многих десятилетий остается одной из наиболее важных задач и физики облаков, и атмосферного электричества. Грозовая деятельность по всему земному шару поддерживает отрицательный заряд Земли, что, в свою очередь, формирует глобальное электрическое поле хорошей погоды. При этом электрическое состояние облаков зачастую определяет не только интенсивность микрофизических процессов в облаке и, как следствие, макропроцессов облака, но даже и возможность их протекания. Исследование процессов, определяющих электрическое состояние облака, актуально при: 1) моделировании облаков; 2) экспериментальном изучении микрофизических процессов (параметры взаимодействия облачных гидрометеоров, конденсация, коагуляция, осадки); 3) натурных исследованиях облаков, включая самолетные и дистанционные методы. Безусловно, облака в разных регионах чрезвычайно различны: высота, горизонтальные размеры, скорости потоков, микроструктура и много другое делают эти облака непохожими. Но тем не менее есть особенности грозовых облаков, которые явно свидетельствуют

об их сходстве [30, 47]: трипольная структура, изотермы основных зарядов в облаке, реверс заряда в нижней части облака, температурный диапазон этой зоны и др.

Это очевидным образом свидетельствует об однотипности процессов, приводящих к возникновению и накоплению зарядов в облаках. Как известно, за время исследования грозовых облаков было предложено две основные схемы электризации грозы: схема электризации облака осадками и конвективная схема. В настоящей работе их сопоставление и анализ проводиться не будет. Безусловно, каждая из них представляет интерес, и каждая вносит свой вклад в дело заряжения конвективного облака. Мы рассмотрим только электризацию облака осадками, т.е. покажем, как микрофизические процессы облака и осадков обуславливают процесс макроэлектризации облака, то есть формирование его электрической структуры.

В статье представлен обзор результатов лабораторных исследований электризации гидрометеоров в облаке. Рассмотрены механизмы электризации облачных гидрометеоров (микроэлектризация), учтены ионная электризация и электризация при взаимодействии твердых частиц осадков с облачными частицами, как кристаллами, так и каплями, в различных температурных режимах от нижней до верхней границы облака. Именно на обобщении разных механизмов электризации делается главный упор в представленной работе. На основе проведенного анализа предложена схема параметризации процессов разделения зарядов при взаимодействии частиц облака и осадков во всей толще кучево-дождевого облака. В заключении делается попытка объяснить формирование электрической структуры облаков.

### **Организованная макроэлектризация облака**

Будем разделять процессы электризации, протекающие в облаке, в зависимости от их масштаба: с одной стороны — микроэлектризацию отдельных облачных элементов — частиц облака и осадков, с другой стороны. — макроэлектризацию всего облака [12].

*Процесс макроэлектризации облака — это процесс разделения разноименно заряженных частиц в пространстве, приводящий к преимущественному накоплению положительных или отрицательных зарядов в больших объемах облака и формированию электрической структуры облака.*

Очевидно, что процесс макроэлектризации облака будет происходить только в том случае, если в значительном объеме облака накапливаются частицы, преимущественно несущие заряды того или иного знака. В кучево-дождевом облаке у мелких облачных частиц скорость падения меньше скорости восходящего потока, и они потоком увлекаются вверх. Вниз опускаются частицы осадков, имеющие массу, при которой скорость их падения больше скорости восходящего потока. Если заряды разных знаков связаны с гидрометеорами разных размеров и, следовательно, разной массы, то под влиянием силы тяжести может произойти макроразделение зарядов в облаке. То есть преимущественная положительная или отрицательная микроэлектризация частиц в зависимости от их размеров (частицы осадков значительно крупнее облачных частиц) и дальнейшее разделение разноименно заряженных частиц в гравитационном поле могут являться причиной разделения макрозарядов в облаке. Отметим, что устойчивая поляризация облака возможна только в том случае, если восходящие потоки в облаке

превышают скорости падения облачных частиц и не превосходят скорость падения частиц осадков. (Подчеркнем, что это условие является и условием гидродинамической устойчивости облаков.)

Из этого можно сделать очевидный вывод о том, что, чем выше скорости восходящих потоков и, как следствие, больше размеры частиц осадков, преодолевающих скорости восходящих потоков, тем активнее протекает как электризация отдельных частиц осадков, так и макроэлектризация всего облака.

Говоря о макроэлектризации облаков и формировании их электрической структур, не будем забывать, что этот процесс протекает не только в грозовых облаках, но и во всех облаках, а также в туманах, если в них происходит направленная микроэлектризация в зависимости от размеров частиц и последующее разделение частиц в объеме облака (тумана) в поле силы тяжести. Однако облака разных форм имеют свою характерную электрическую структуру. И только в кучево-дождевых облаках зарядение частиц осадков и дальнейшее разделение зарядов в облаке приводит к формированию электрической структуры грозовых облаков с напряженностью, при которой возникают молниевые разряды.

### Ионная электризация облачных гидрометеоров

Ионную электризацию частиц в облаках легко объяснить, учитывая, что в атмосферном воздухе всегда есть ионы. Этот механизм электризации облачных частиц всегда рассматривается наряду с другими механизмами.

Заряд частиц в облаках может меняться в результате взаимодействия с ними ионов (ионная электризация). Как правило, механизм ионной электризации сопровождает процесс конденсационного роста частиц [16]. Это означает, что в основной начальной стадии развития облаков и туманов изменение их электрических характеристик обязано зарядению частиц за счет ионов атмосферы.

Атмосферные ионы взаимодействуют с частицами в облаках, в результате чего может меняться заряд частиц. Остановимся на роли различных параметров, характеризующих это взаимодействие. Эти вопросы были подробно изучены и теоретически, и экспериментально, например в [15, 16]. Наиболее важные из параметров, определяющих взаимодействие, — характерный размер частицы ( $r$ ) и длина свободного пробега ( $l$ ) ионов. Если  $r$  значительно больше  $l$ , то реализуется так называемый диффузионный режим электризации частиц, при котором величиной  $l$  в первом приближении можно пренебречь. Введем в рассмотрение  $\beta_i(\chi, r)$  — частоту захвата (прилипания) легкого иона частицей радиусом  $r$  и зарядом  $\chi e$  (при этом условимся, что если величина относится к положительным ионам, то  $i = 1$ , если к отрицательным, то  $i = 2$ ). Было получено выражение для  $\beta_i(\chi, r)$ :

$$\beta_i(\chi, r) = \frac{(-1)^i \chi e u_i (\epsilon_0)^{-1}}{1 - \exp\left[(-1)^{i+1} \frac{\chi e^2}{4\pi\epsilon_0 r k T}\right]}, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды;  $u$  — подвижность ионов.

Тогда изменение заряда частицы облака или тумана можно описать следующим выражением:

$$\frac{dq}{dt} = e[n_1\beta_1(\chi, r) - n_2\beta_2(\chi, r)]. \quad (2)$$

Были проведены лабораторные эксперименты по изучению процессов электризации грубодисперсных аэрозолей облаков и туманов. Эти эксперименты продемонстрировали согласие между результатами теоретических описаний ионного заряжения аэрозолей с данными лабораторных исследований. Кроме того, было обнаружено, что существует некоторое преимущественное отрицательное заряджение капелек.

Одной из модификаций механизма ионного заряжения является схема Френкеля–Шишкина [15]. В ней облако рассматривается как коллоидно-дисперсная среда, в которой капельки благодаря большому сродству воды с отрицательными ионами заряжаются отрицательно, а воздух — положительно. При падении капелек происходит разделение зарядов в облаке. Коагуляция заряженных облачных капелек ведет к ускорению процесса формирования объемных зарядов в облаке. Однако этот механизм имеет следующие ограничения. Во-первых, количество ионов ограничено проводимостью воздуха в облаке. Но, как показали исследования, даже в чистой атмосфере на этих высотах концентрации ионов малы, не говоря об облаках, где концентрации ионов значительно ниже. Возможно, роль этого механизма возрастает при напряженностях поля в предгрозовом состоянии, когда в облаке уже сформированы большие объемные заряды и начинается коронирование ионов с облачных гидрометеоров. Однако должны быть другие механизмы формирования этих зарядов. Во-вторых, в объяснении действия ионного механизма микроэлектризации нет ясного физического обоснования постоянного заряджения капли ионами того же знака, что и сама капля.

Еще раз подчеркнем, что ионное заряджение облачных частиц может объяснить их незначительную электризацию на начальной стадии развития облаков и в туманах. Этот механизм электризации не может привести к появлению значительных зарядов отдельных частиц и формированию наблюдаемых в грозовых облаках облачных зарядов.

### **Контактная электризация облачных гидрометеоров**

Контактная электризация облачных гидрометеоров происходит в результате взаимодействия частиц между собой или их спонтанного разрушения (контактная электризация). Столкновение облачных гидрометеоров, то есть частиц облака и осадков, приводит либо к их слиянию — коагуляции, либо к разделению возникшего контакта. Исследования показали, что разрушение контакта облачных гидрометеоров (а также и спонтанное разрушение отдельных частиц) сопровождается электризацией фрагментов контакта (соответственно, фрагментов спонтанно разрушившейся частицы).

В радиолокационной метеорологии установлено, что при достижении уровня интенсивной кристаллизации ( $H_{\text{крист}}$ ) облако переходит в стадию грозовой активности [8, 17]. Более того, в [17] представлены критерии грозоопасности облака, учитывающие протяженность облака выше  $H_{\text{крист}}$ . Такой подход, разработанный на основании радиолокационных наблюдений за грозами, является явным свидетельством значительной роли ледяных частиц в формировании облачных зарядов.

Подчеркнем определяющее значение экспериментально установленного факта, что только в облаках, содержащих ледяные гидрометеоры (частицы осадков и облачные частицы), «работают» наиболее мощные механизмы микроэлектризации, при этом чем больше ледяных частиц и чем они крупнее, тем большие заряды генерируются в облаке.

### **Электризация крупинки (или градины) в результате столкновения с нею облачных кристаллов**

Пожалуй, наиболее изученный из механизмов электризации облачных частиц — электризация крупинки (или градины) в результате столкновения с нею облачных кристаллов. И не случайно: этот процесс активно работает выше уровня интенсивной кристаллизации и его во многом определяющая роль в процессе электризации облака очевидна.

Отскок кристалликов льда при их столкновении с крупной ледяной частицей — крупинкой или градиной — приводит к взаимной электризации столкнувшихся частиц. Величина и знак разделяющегося заряда  $\Delta q_{г-л}$  определяются процессами в квазижидком слое, возникающем в зоне контакта [16]. Однако до настоящего времени нет развитой теории электризации ледяных частиц, происходящей в результате их столкновения, которая объясняла бы все наблюдаемые эффекты. Одним из первых исследований этого механизма заряжения частиц были проведенные Рейнольдсом и др. [41] лабораторные измерения заряда, передаваемого на обледеневающую крупинку, когда кристаллы льда отскакивают и уносят равный по величине и противоположный по знаку заряд. Отметим, что электризация может протекать как в присутствии переохлажденных капелек, так и в их отсутствии. Начиная с работы [46] было показано, что в облаке при столкновении кристалликов с крупинками разделяются значительные заряды, при этом знак заряда зависит от водности облака. Подробный анализ этих работ представлен в [27, 42].

Перечислим основные факторы, влияющие на заряжение частиц.

Знак заряда градины, приобретаемого ею в результате столкновения с ней ледяных кристалликов, зависит от водности и температуры в среде. В [11] было выдвинуто предположение, что знак приобретаемого градиной заряда зависит от режима ее роста. Для этого была рассчитана равновесная толщина пленки по методике, предложенной в [9]. Расчеты показали, что зона положительного заряжения градины или крупинки качественно соответствует зоне мокрого роста льда, а зона отрицательного заряжения — зоне его сухого роста. Видимо, структура ледяной поверхности, определяемая режимом кристаллизации, является одним из факторов, контролирующих процесс заряжения частиц при их столкновении.

Подробно этот вопрос исследовался в работе [28]. Результаты свидетельствуют о том, что заряд, разделяющийся в мокром режиме роста градины, на порядок меньше заряда, разделяющегося в сухом режиме роста. Это позволяет сделать вывод, что заряжение градин в мокром режиме едва ли может играть важную роль в электризации гроз.

Примеси, меняющие поверхностные свойства льда, в том числе его электрокинетический потенциал, также влияют на электризацию. Так, в присутствии примесей хлорида натрия меняется не только вид зависимости заряжения от водности и температуры, но и знак заряда [27].

В [24] было выдвинуто предположение, что величина разделяющегося заряда определяется площадью контакта сталкивающихся частиц и, следовательно, зависит от размера кристаллика  $d_n$  и скорости его столкновения  $v_{ст}$  с градиной. Большинство исследователей, считая коэффициенты взаимодействия частиц постоянными, получили, что заряд, разделяющийся при столкновении частиц, пропорционален  $(v_{ст})^4$ . При скорости столкновения, меньшей некоторого порогового значения, электризация отсутствует. Для частиц диаметром  $d_n = 10$  мкм пороговое значение  $v_{ст}$  составляет 4 м/с.

В [37] был проведен анализ зависимости  $\Delta q_{л-л}$  от  $d_n$ . Авторы считают, что, поскольку во всех опытах значения скорости столкновения, температуры, размеров кристаллов и условия роста льда были различны, строгой зависимости и полного совпадения ожидать нельзя. Они предложили приближенную формулу для интервала размеров 10 мкм  $\leq d_n \leq 300$  мкм:

$$\Delta q_{л-л} = cd_n^2, \quad (3)$$

где  $c = 5 \cdot 10^{-6}$  Кл·м<sup>2</sup>.

На рис. 1 нанесены данные, приведенные в [37], данные более поздних работ и проведена линия I I по формуле (3). Из рисунка видно, что предложенная в [37] формула удовлетворительно согласуется с более поздними результатами. Для кристаллов  $d_n \geq 300$  мкм формула (3) не выполняется. Такой результат можно было ожидать, поскольку кристаллы больших размеров имеют неправильную форму, следовательно, при их столкновении с градиной зона контакта в меньшей мере определяется размером частиц.

### **Электризация крупинки (или градины) в результате столкновении с ней переохлажденных облачных капель**

При столкновении с градиной (или крупинкой) переохлажденных капель происходит разрушение капель, сопровождающееся разделением заряда. Этот процесс кардинально различается в зависимости от того, каким образом разрушается капля: в результате раскалывания при замерзании капли на поверхности градины или в результате разбрызгивания капли и ее частичного намерзания на градине. Заряды, приобретаемые градиной в том или ином процессе, различаются не только по величине разделяющегося заряда; но и знак заряда, приобретаемый градиной, зависит от того, каким образом протекало разрушение капли.

*А. Электризация при разбрызгивании переохлажденных капель на крупной ледяной частице.* Разбрызгивание и частичное намерзание переохлажденных капель на крупной ледяной частице сопровождается разделением зарядов. Этот механизм изучался в работах [7, 15, 23, 36, 44, 45]. Как считают исследователи этого процесса, разделение заряда происходит в результате: а) дробления капель; б) кристаллизации воды на поверхности льда. На наш взгляд, теория контактной электризации наиболее полно объясняет процесс заряжения частиц [8]. Вероятным фактором, определяющим, происходит ли разбрызгивание или взрывание переохлажденной капли при ее столкновении с градиной, является режим роста градины. Если градина растет в мокром режиме, то при столкновении с ней капли разбрызгиваются.

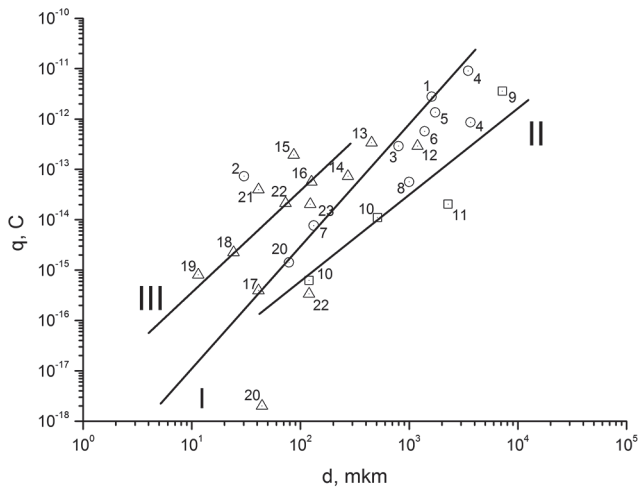


Рис. 1. Заряды, приобретаемые градиной в результате столкновения с нею облачных кристалликов и капель, по экспериментальным работам разных авторов: I (○) — взрыв кристаллизующихся капель (спонтанно или при ударе о ледяную поверхность); II (□) — разбрызгивание ледяных капель на градине; III (Δ) — столкновение и отскок ледяных частиц. 1 — [10]; 2 — [25]; 3 — [40]; 4 — [15]; 5 — [23]; 6 — [43]; 7 — [25]; 8 — [4]; 9 — [44]; 10 — [45]; 11 — [36]; 12 — [33]; 13 — [34]; 14 — [35]; 15 — [41]; 16 — [18]; 17 — [21]; 18 — [19]; 19 — [37]; 20 — [33]; 21 — [41]; 22 — [31]; 23 — [24]

Опыты проводились с частицами, имитирующими градины, установленные в аэродинамической трубе или на вращающемся коромысле в облачной камере. Была обнаружена зависимость заряжения от скорости столкновения, температуры и размера переохлажденных капель. Опыты проводились для капель  $40 \text{ мкм} \leq d_k \leq 125 \text{ мкм}$ . Было установлено, что разрушение капель и электризация наблюдаются [45], если скорость столкновения превосходит некоторое пороговое значение. С ростом диаметра капель значение пороговой скорости уменьшается. Этот процесс анализировался в [7], где показано, что разрушение с образованием вторичных капелек возможно для тех капель, кинетическая энергия которых значительно больше ее поверхностной энергии. Как показано в [45], знак заряда ледяной мишени зависит от состава примесей. В этой работе исследовалось заряжение ледяной мишени при различных скоростях столкновения с ней капель и при различном составе капель. В результате разбрызгивания переохлажденной капли чистой воды градина заряжается положительно. При разбрызгивании капель раствора NaCl градина заряжается отрицательно, при разбрызгивании капель раствора  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  — положительно. В экспериментах прежде всего была обнаружена зависимость заряжения от размеров переохлажденных капель, а также от скорости столкновения капель с градиной и температуры капель. Для исследования зависимости заряда  $\Delta q_{\text{разб}}$ , разделяющегося при разбрызгивании капель на поверхности градины от размера капель были использованы результаты работ [36, 44, 45]. Несмотря на неизбежное расхождение значений, полученных разными авторами в разных условиях, удалось найти осредненную зависимость величины разделяющегося заряда от размера капли

чистой воды (см. рис. 1, линия II). Эта зависимость может быть описана следующей приближенной формулой:

$$\Delta q_{\text{разб}} = b d_k^{1,7}, \quad (4)$$

где  $b = 5 \cdot 10^{-9}$  Кл·м<sup>-1,7</sup>.

Подчеркнем, что формула получена при использовании результатов экспериментов с каплями чистой воды. Как отмечалось выше, при разбрызгивании переохлажденных капель растворов меняется не только значение, но и знак заряда, приобретаемого градиной в результате столкновения с каплей. Можно предположить, что при сильном антропогенном загрязнении атмосферного воздуха возможно изменение не только скорости электризации облаков, но и их полярности.

**Б. Электризация при замерзании, деформации и раскалывании переохлажденных капель.** Замерзание переохлажденной капли нередко приводит к ее деформации и раскалыванию. В результате взрывания замерзающей капли образуются ледяные осколки, иногда выбрасывается сплинтер незамерзшей воды. Этот процесс сопровождается разделением зарядов [9, 10, 25, 40, 45]. Исследования показали, что электризация происходит за счет кристаллизации воды. Отметим, что в экспериментальных работах по разделению зарядов в результате взрывообразного разрушения замерзающих капель приводятся неоднозначные, иногда противоречивые, данные. Но при обобщении можно прийти к выводу, что ледяные осколки, образующиеся в результате спонтанного взрывания капли, обычно заряжаются положительно, незамерзшая вода — отрицательно. Если взрывание капли происходит в результате ее столкновения с градиной и вода намерзает на поверхности градины, то градина заряжается отрицательно. При этом, очевидно, можно выдвинуть предположение, что взрывание переохлажденных капель происходит только в том случае, когда градина растет в сухом режиме.

Опыты по изучению спонтанного взрывания проводились с каплями воды, подвешенными на нитях или термопарах в холодильных камерах, либо с каплями, замерзающими при свободном падении или во взвешенном состоянии. Согласно результатам этих опытов, существует некоторая зависимость вероятности раскалывания капель от ее размера, температуры, скорости охлаждения и давления в среде. Так, в [3] показано, что понижение давления является фактором, благоприятным для раскалывания капли. Анализ зависимости вероятности взрывания капли  $P$  от ее размера  $d_k$  показал, что с ростом капли растет вероятность ее раскалывания, при этом капли менее критического размера не разрушаются. Для капель  $d_k \geq 500$  мкм вероятность раскалывания превышает 20 % и растет с увеличением диаметра. Раскалывание замерзающих капель, наблюдаемое при их столкновении с ледяной поверхностью, получило название эффекта Моссопа—Хэллета. В [38] исследовалась температурная зависимость частоты взрывания капель диаметром  $d_b = 24$  мкм. Было получено, что при скорости столкновения  $v_{\text{ст}} < 4$  м/с капли такого размера взрываются, если  $-8^\circ\text{C} \leq T \leq -3^\circ\text{C}$ , максимальное число взрываний наблюдалось при  $T = -5^\circ\text{C}$ .

В [10, 15, 23, 25, 33, 40, 48] и других работах были проведены исследования электризации модельной градины в потоке капелек воды, замерзающих и взрывающихся



на ее поверхности. Был обнаружен параллелизм между зависимостью количества образующихся ледяных осколков и разделяющимся зарядом от диаметра замерзающей капли. Градина приобретала отрицательный заряд.

Значения зарядов  $\Delta q_{вз}$ , разделяющихся при взрывообразном разрушении замерзающих капель, в работах разных авторов различаются на несколько порядков, что неизбежно при существующем несовпадении в условиях экспериментов. Для анализа, используя уже предложенный подход, была предпринята попытка [11] найти зависимость величины разделяющегося заряда от размеров взрывающихся капель. С этой целью результаты всех перечисленных работ были нанесены на график (линия I), где приведены абсолютные значения зарядов, разделяющихся при взрывании переохлажденных капель (спонтанном или вызванном ударом о ледяную поверхность) и размеры капель  $d_k$ . Из-за ограниченного числа данных в анализе не разделяли результаты при различных процессах раскалывания капель — спонтанном или вызванном ударом о поверхность. Очень высокое значение заряда, полученное в [23], другими работами не подтверждено и поэтому при получении зависимости  $\Delta q_{вз}$  от  $d_k$  не учитывалось. Эта зависимость величины разделившегося заряда  $\Delta q_{вз}$  может быть выражена следующей приближенной формулой:

$$\Delta q_{вз} = ad_k^{2,4}, \quad (5)$$

где  $a = 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-2,4}$ .

Некоторым ограничением действия этого механизма электризации может стать размер капли, при взрывании которой происходит ее разрушение с образованием не только осколков, но и сплинтера незамерзшей воды. Эксперименты по исследованию электризации градин проводились для переохлажденных капель, диаметр которых не меньше 100 мкм. Возможно, что при разрушении более мелких капель образуются только осколки, как при эффекте Моссопа–Хэллета. При этом направленной электризации градины и осколков не происходит.

Изучению этого вопроса было посвящено много теоретических исследований. В настоящее время для объяснения механизма образования зарядов при разрушении замерзающих капель рассматриваются три теории: электризация кристаллизующейся воды и водных растворов, контактной и термоэлектрической электризации. Ссылки на них можно найти в [4, 14, 10].

Сравним эффективность электризации градины при разрушении на ее поверхности переохлажденных капель (см. рис. 1). Видим, что электризация при взрывании капель является наиболее мощным механизмом микроэлектризации. При этом вверх летят положительно заряженные осколки, а с опускающимися частицами осадков отрицательный заряд переносится вниз; то есть макроряды в облачном диполе будут располагаться следующим образом: вверху — плюс, внизу — минус. Разбрызгивание переохлажденных капель на поверхности градины сопровождается значительно менее мощной микроэлектризацией. При этом падающие градины приобретает положительный заряд и переносит его вниз, а капельки, возникшие при разбрызгивании переохлажденной капли, приобретают отрицательный заряд и выносятся восходящим потоком вверх, то есть макроряды будут иметь обратное расположение: вверху — минус, внизу — плюс.

Возможно, разбрызгивание капель является одним из механизмов изменения знака заряда частиц осадков в нижней части облака, приводящий к формированию облачного триполя. Что же управляет процессом разрушения капель, приводящего либо к их взрыванию, либо к их разбрызгиванию? Выше было выдвинуто предположение, что определяющим фактором, произойдет ли взрывание переохлажденной капли или ее разбрызгивание, является режим роста градины. При этом в сухом режиме роста града переохлажденная капля взрывается (градина заряжается отрицательно), в мокром режиме роста града переохлажденная капля разбрызгивается (градина заряжается отрицательно). Неучет режима роста града может привести к значительному завышению скорости электризации облака при формировании облачного диполя и даже к искажению результатов расчета с помощью численной модели. Это замечание можно отнести к результатам моделирования электрической активности облаков в [1, 5, 6]. В этих работах осуществляется моделирование основных процессов электризации частиц облака и осадков. Однако в расчетах не учитывался режим роста града и предполагалось, что при любых размерах переохлажденных капель их взрывание сопровождается разделением заряда. Это, вероятно, могло привести к завышению скорости электризации как частиц осадков, так и всего облака.

### Электризация, возникающая в результате слиянии облачных гидрометеоров

Если при столкновении заряженных облачных частиц происходит их слияние, то частица-коллектор приобретает заряд частиц, которые слились с ней. В этом случае скорость заряжения частицы-коллектора (крупинки, градинки и др.) может быть рассчитана следующим образом:

$$\frac{dQ}{dt} = \pi \sum_i E_i F_i (R + r_i)^2 (V - v_i) n_i q_i, \quad (6)$$

где  $Q$ ,  $R$ ,  $V$  — заряд, радиус и скорость падения более крупной частицы-коллектора;  $E_i$ ,  $F_i$  — вероятность столкновения  $i$ -ой облачной частицы и вероятность слияния  $i$ -ой облачной частицы с частицей-коллектором;  $r_i$ ,  $v_i$ ,  $n_i$ ,  $q_i$  — радиус, скорость падения, концентрация и заряд  $i$ -ой облачной частицы.

Очевидно, что на электризацию капель и ледяных частиц в облаках и туманах оказывают влияние особенности взаимодействия этих частиц. При этом надо помнить, что параметры взаимодействия (вероятности столкновения и слияния частиц) меняются, если частицы заряжены: для разноименно заряженных частиц эти параметры возрастают, для одноименно заряженных — убывают [27]. Это приводит к тому, что в облаках, содержащих большое количество заряженных частиц, коагуляция может протекать значительно быстрее, чем в облаках, в которых отсутствуют частицы с большими зарядами.

### Обсуждение и выводы

В работе рассмотрены механизмы электризации частиц облака и осадков, последовательно «включающиеся» по мере развития грозового облака. На самой начальной

стадии «работает» ионное заряджение. После появления в облаке крупинки и кристаллов, в присутствии переохлажденных капель, включается мощный механизм микроэлектризации «лед — лед». Подчеркнем, что на стадии роста кучево-дождевого облака эти процессы, происходящие при столкновении облачных гидрометеоров, ведут лишь к заряджению частиц (крупинки заряжаются отрицательно, кристаллики положительно). При этом поляризации облака не происходит, так как заряженные частицы в мощном восходящем потоке находятся в одном объеме [7]. Когда облако достигает стадии «зрелости», то есть частицы осадков (крупинки и град) вырастают до размеров, достаточных для преодоления восходящих потоков, зона осадков начинает опускаться вниз. И тут происходит спонтанная поляризация облака [14, 38]: падающие градины выносят вниз отрицательный заряд, положительно заряженные кристаллы составляют верхнюю часть и наковальню грозового облака.

Отметим, что в центральной части облака концентрация капель, размер которых больше критического для начала электризации, велика. При падении сквозь облако, крупные крупинки и градинки, сталкиваясь с каплями, заряжаются по-разному в зависимости от режима ледяных частиц. В верхней части облака, в области «сухого роста» крупы (и града), происходит взрывание крупных переохлажденных капель при столкновении крупинками. Крупа заряжается отрицательно и при падении выносит в нижележащий уровень отрицательный заряд. Падая вниз (при более высоких температурах и более высокой влажности облака), градины (крупинки) растут в «мокром режиме», и уже теперь электризация происходит в результате разбрызгивания капелек на градине. Градина заряжается положительно. Следовательно, происходит перезаряджение твердых частиц осадков.

Таким образом, в результате последовательного «включения» основных механизмов микроэлектризации в процессе эволюции грозового облака отрицательно заряженные гидрометеоры накапливаются в центральной части облака. Верхняя часть *Св* заряжена положительно, нижняя часть — отрицательно. Электрическая структура кучево-дождевого облака — диполь. В случае если нулевая изотерма находится выше уровня конденсации, нижняя часть также может быть заряжена положительно. Формирующаяся электрическая структура грозового облака — триполь [45]. Очевидно, возникает вопрос о том, зависит ли электрическая структура облака (диполь или триполь) от уровня расположения нулевой изотермы в облаке. Но этот вопрос следует адресовать исследователям грозовых облаков в полевых условиях.

### Литература

1. *Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Кулиев Д.Д., Продан К.А., Шаповалов В.А.* Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. LVI. № 11–12. — С. 1–9.
2. *Баранов В.Г.* Особенности формирования электрической структуры конвективного грозового облака по данным численной нестационарной модели: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Л., 1990. — 14 с.
3. *Башкирова Г.М., Молоткова И.А.* К вопросу о разрушении капель при замерзании // Тр. ГГО. 1981. Вып. 439. — С. 55–68.

4. *Бурчуладзе Н.Н., Громова Т.Н., Никандров В.Я., Першина Т.А., Шишкин Н.С.* Экспериментальные исследования роли замерзания и разрушения облачных элементов в электризации конвективного облака // Тр. ГГО. 1982. Вып. 457. — С. 141–148.
5. *Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Морозов В.Н.* О параметризации микрофизических процессов в численных моделях грозовых облаков // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. — С. 5–18.
6. *Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Гопалакришнан В., Комаровских К.Ф., Муругавел П., Павар С.Д., Синькевич А.А.* Численное моделирование влияния сильного аэрозольного загрязнения атмосферы на динамику электрической структуры кучево-дождевого облака // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. — С. 5–18.
7. *Евтеев Б.Ф.* Основные закономерности электризации тел, движущихся в потоке капель. Экспериментальное исследование: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Л., 1978. — 22 с.
8. *Имянитов И.М.* Строеение и условия развития грозовых облаков // Метеорология и гидрология. 1981. № 3. — С. 5–17.
9. *Качурин Л.Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы. — Л. Гидрометеиздат, 1990.
10. *Качурин Л.Г., Бекряев В.И.* Исследование процесса электризации кристаллизующейся воды // ДАН СССР. 1960. Т. 130. № 1. — С. 57–60.
11. *Кашлева Л.В.* Взаимосвязь электрических и других метеорологических параметров грозовых облаков: дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Л.: ГГО, 1987.
12. *Кашлева Л.В.* Атмосферное электричество: учеб. пос. — СПб.: РГГМУ, 2008. — 116 с.
13. *Михайловский Ю.П.* О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации // Труды ГГО. 2016. Вып. 580. — С. 125–138.
14. *Михайловский Ю.П., Кашлева Л.В.* Методика и результаты исследований электризации конвективных облаков с помощью самолетов // Сб. тр. «Радиолокационная метеорология и активные воздействия», 2012. — С. 98–114.
15. *Мучник В.М.* Физика грозы. — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 351 с.
16. *Мучник В.М., Фишман В.Е.* Электризация грубодисперсных аэрозолей в атмосфере. — Л.: Гидрометеиздат, 1982. — 207 с.
17. *Руководство по производству наблюдений и применению информации с радиолокаторов МРЛ-1 и МРЛ-2.* — Л.: Гидрометеиздат, 1974. — 334 с.
18. *Aufdermaur A.N., Johnson D.A.* Charge Separation Due to Riming in the Electric Field // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1972. Vol. 98. — P. 369–382.
19. *Buzer O., Aufdermaur A.N.* Electrification by Collision of Ice Particles on Ice or Metal Targets. — Steinkopf, P. 294–300.
20. *Chou C.S.* Numerical Study of Cloud Electrification in an Asymmetric Time-Dependent Cloud Model // J. Geoph. Res. 1978. Vol. 83. — P. 5025–5049.
21. *Church C.P.* The Electrification of Hail. Ph. D. Thesis, Univ. Durham, England, 1966.
22. *Evans D.J., Hatahinson W.C.H.* The Electrification of Freezing Water Droplets and Particles // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1963. Vol. 89. No. 381. — P. 370–375.
23. *Gaskell W.* A Laboratory Study of Thunderstorm Electrification // Quar. J. Roy. Met. Soc. 1981. Vol. 107. No. 450. — P. 955–966.
24. *Gaskell W., Illingworth A.J.* Charge Transfer Accompanying Individual Collisions between Ice Particles and Its Role in Thunderstorm Electrification // Quar. J. Roy. Met. Soc. 1980. Vol. 106. No. 450. — P. 841–854.
25. *Hallet J., Saunders C.P.R.* Charge Separation Associated with Secondary Crystal Production // J. Atm. Sci. 1979. Vol. 36. — P. 2230–2235.
26. *Illingworth A.J., Latham J.* Calculations of Electric Field Growth, Field Structure and Charge Distributions in Thunderstorms // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1977. Vol. 103. No. 436. — P. 281–297.
27. *Jayarathne E.R., Saunders C.P.R., Hallet J.* Laboratory Studies of the Charging of Softail During Ice Crystal Interactions // Quart. J. Roy. Met. Soc. 1983. Vol. 109. — P. 609–630.
28. *Rohan J., Saunders C.* Wet Hail and Thunderstorm Electrification. XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15–20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A.
29. *Klimin N.N., Kashleva L.V.* Collision Efficiency of Cloud Droplets in the Presence of Electric Field // Prec. of 16th International Conference on Clouds and Precipitation, Leipzig, 2012.

30. *Krehiebl R.P., Brook M., Lhermitte R.L., Lennon C.I.* Lightning Charge Structure in Thunderstorms // VI<sup>th</sup> Int. Conf. Atm. Elect., Manchester, 1980.
31. *Latham J.* The Electrification of Thunderstorms // *Quar. J. Roy. Met. Soc.* 1981. Vol. 107. — P. 277–289.
32. *Latham J., Mason B.J.* Generation of Electric Charge Associated with the formation of Soft Hail in Thunderstorms // *Proc. Roy. Soc.* 1961. Vol. A260. — P. 537–549.
33. *Latham J., Miller A.H.* The Role of Ice Specimen and Impact Velocity in the Reynolds-Brook Theory of Thunderstorm Electrification // *J. Atm. Sci.* 1965. Vol. 22. — P. 505–508.
34. *Latham J., Montagne J.* The Possible Importance of Electrical Forces in the Development of Show Cornices // *J. Glaciol.* 1970. Vol. 9. — P. 375–385.
35. *Latham J., Stow C.D.* A Laboratory Investigation of the Electrification of Show-Storms // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 1967. Vol. 93. — P. 55–68.
36. *Latham J., Warwicker R.* Charge Transfer Accompanying the Splashing of Supercooled Raindrops on Hailstone // *Quar. J. Roy. Met. Soc.* 1980. Vol. 106. — P. 559–568.
37. *Marshall B.J.P., Latham J., Saunders C.P.R.* A Laboratory Study of Charge Transfer Accompanying the Collision of Ice Crystals with a Simulated Hailstone // *Quar. J. Roy. Met. Soc.* 1978. Vol. 104. — P. 163–178.
38. *Mikhailovskii Yu.P., Kashleva L.V., Mikhailovskii V.Yu.* Phenomenon of “warm thunderstorm” // *Prec. of 16<sup>th</sup> International Conference on Clouds and Precipitation, Leipzig, 2012.*
39. *Mason B.J., Maybank J.* The Fragmentation and Electrification of Freezing Water Drops // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 1960. Vol. 86. No. 368. — P. 176–186.
40. *Mossop S.C.* The Influence of Drop Size Distribution on the Production of Secondary Ice Particles During Graupel Growth // *Quar. J. Roy. Met. Soc.* 1978. Vol. 104. — P. 323–330.
41. *Reynolds S.E., Brook M., Lourley P.M.* Thunderstorm Charge Separation // *J. Met.* 1957. Vol. 14. — P. 426–436.
42. *Saunders C.* Charge Separation Mechanisms in Clouds // *Space Sci Rev.* 2008. Vol. 137. — P. 335–353.
43. *Scott D., Hutchinson W.C.H.* The Electrification of Freezing Water Drops // *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 1965. Vol. 91. No. 387.
44. *Shewchuk S.P., Aribert J.V.* Charge Separation During Splashing of Large Drops on Ice // *Quar. J. Roy. Met. Soc.* 1971. Vol. 97. — P. 272–282.
45. *Shewchuk S.P., Aribert J.V.* Electrification Associated with Droplet Accretion on Ice // *Quar. J. Atm. Sci.* 1974. Vol. 31. — P. 777–786.
46. *Takahashi T.* Riming Electrification as a Charge Separation Mechanism in Thunderstorms // *J. Atm. Sci.* 1978. Vol. 35. — P. 1536–1548.
47. *Williams Earle R.* The Tripole Structure of Thunderstorms // *Journal of Geophysical Research.* Vol. 94. No. D11. — P. 113151–113167.
48. *Worrman T.J.* Atmospheric Electrical Effects Resulting from the Collision of Supercooled Water Drops and Hail // *The Physics of Ice.* Eds. by Richl, Bullemer and Engelhard. 1969. — P. 1652–1661.