

М.И. Баранов

## НОВАЯ ГИПОТЕЗА И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ, НАКОПЛЕНИЯ И РАЗДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В АТМОСФЕРНЫХ ОБЛАКАХ ЗЕМЛИ

*Висунуто нове наукове припущення, пов'язане з можливістю існування додаткових механізмів виникнення, накопичення і розділення електричних зарядів в шарувато-дощових, купчасто-дощових і грозових атмосферних хмарах, що формуються в тропосфері планети Земля. У основу нової гіпотези покладені електрофізичні процеси в повітряній атмосфері, що базуються на присутності в ній дрібних твердих діелектричних часток сферичної форми, які електризуються в теплих висхідних повітряних потоках та мають об'ємну щільність по порядку величини рівну об'ємній щільності в атмосфері дрібних водяних крапель. Шляхом розрахункових оцінок обґрунтовано показано, що пропонувані додаткові механізми формування і розвитку атмосферних хмар здатні забезпечувати досягнення в них експериментально підтверджених рівнів об'ємної щільності хмарних зарядів, сумарного електричного заряду, що запасається, і напруженості електричного поля. Отримані результати сприятимуть подальшому розвитку природи атмосферної електрики, фізики лінійної блискавки і вирішенню глобальної проблеми блискавокозахисту земної техносфери. Бібл. 13, рис. 2.*

*Ключові слова:* атмосферна електрика, нові механізми виникнення, накопичення і розділення електричних зарядів в атмосферних хмарах, гіпотеза, розрахунок, експериментальні дані.

*Выдвинуто новое научное предположение, связанное с возможностью существования дополнительных механизмов возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в слоисто-дождевых, кучево-дождевых и грозовых атмосферных облаках, формируемых в тропосфере планеты Земля. В основу новой гипотезы положены электрофизические процессы в воздушной атмосфере, базирующиеся на присутствии в ней электризуемых в теплых восходящих воздушных потоках мелких твердых диэлектрических частиц сферической формы, имеющих объемную плотность по порядку величины равную объемной плотности в атмосфере мелких водяных капель. Путем расчетных оценок обосновано показано, что предлагаемые дополнительные механизмы формирования и развития атмосферных облаков способны обеспечивать достижение в них экспериментально подтвержденных уровней объемной плотности облачных зарядов, суммарного запасаемого электрического заряда и напряженности электрического поля. Полученные результаты будут способствовать дальнейшему развитию природы атмосферного электричества, физики линейной молнии и решению глобальной проблемы молниезащиты земной техносферы. Библ. 13, рис. 2.*

*Ключевые слова:* атмосферное электричество, новые механизмы возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках, гипотеза, расчет, экспериментальные данные.

**Введение.** Несмотря на достигнутые к настоящему времени большие успехи в разгадке тайн происхождения атмосферного электричества, восходящие своими «корнями» к основополагающим научным идеям и пионерским работам XVIII столетия выдающихся физиков мира – россиянина М.В. Ломоносова [1] и американца Б. Франклина [2] в данной области человеческих знаний, по мнению авторитетных электрофизиков современности нельзя считать электрофизические процессы, связанные с образованием и развитием грозовых облаков в атмосфере Земли, достоверно описанными и окончательно изученными [3]. Следует отметить, что под атмосферным облаком понимается скопление мелких водяных капель (пересыщенного водяного пара), мелких кристаллов льда и мелких твердых частиц, поднятых вверх с поверхности земли и с зон дымовых выбросов работающих промышленных предприятий (например, мощных тепловых электрических станций) в тропосферу (нижнюю часть земной атмосферы высотой до 11 км в умеренных широтах, в которой содержится 4/5 всей массы атмосферы, почти весь водяной пар и развиваются облака [4]) теплыми восходящими потоками воздуха [3]. Что касается понятия атмосферного грозового облака, то оно становится таковым из кучево-

дождевого облака при выполнении ряда критических условий, сформулированных в [3]. Известно, что указанные выше процессы включают в себя [3]: различные механизмы электризации жидких и твердых частиц облаков; процессы возникновения, существования, накопления и разделения электрических зарядов в крупномасштабной области облаков с неоднородными локальными температурными и скоростными режимами; процессы формирования электрических полей в мелкодисперсной среде облаков; электроразрядные явления в грозовых облаках и окружающей их воздушной атмосфере, существенно влияющих на функционирование электроники технических средств, среду обитания человека и его жизнедеятельность. Без изучения этих непростых с научной точки зрения процессов, характерных для всех территорий нашей планеты, невозможно дальнейшее развитие физики молнии, молниезащиты и понимание роли заряженных облаков в глобальной электрической цепи Земли.

Необходимо заметить, что с момента установления электрической природы линейной молнии (длинного искрового разряда в воздушной атмосфере [5-8]) в мире было предложено около 80 теорий [3], описывающих в том или ином приближении это глобальное

© М.И. Баранов

природное явление. Тем не менее, на сегодня нет ни одной теории этого сложного электрофизического явления, достоверно объясняющей многие известные наблюдающим его специалистам экспериментальные данные. Поэтому дальнейшее развитие и усовершенствование не только этих теорий, но и отдельных моментов, а также механизмов в описании протекания указанных процессов в атмосферном грозном облаке являются в мире актуальными научными задачами.

Согласно [3, 7, 8] основное внимание специалистов-электрофизиков при рассмотрении на начальной стадии формирования зарядов в облаках было обращено на электризацию в теплых восходящих воздушных потоках атмосферы мелких водяных капель. По неизвестным автору причинам о мелких твердых частицах, перемещающихся в упомянутых воздушных потоках, просто забыли. А ведь они также, как и водяные капли, способны к электризации в восходящих воздушных потоках и к дальнейшему участию в процессах накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных грозных облаках. О природных процессах активной электризации мелких твердых частиц в теплых воздушных потоках наглядно свидетельствуют часто наблюдаемые людьми грозы, происходящие при песчаных бурях в пустынях мира и мощных извержениях вулканов на Земле (рис. 1) [9]. На мой взгляд, только комплексный и многосторонний подход к проблеме происхождения атмосферного электричества способен содействовать ее решению.

**Целью статьи** является разработка новой гипотезы о возможных дополнительных механизмах возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках, содержащих мелкодисперсные капли воды, мелкие твердые диэлектрические частицы и кристаллы льда. Подчеркнем то, что используемый термин «*гипотеза*» происходит от греческого слова «*hypothesis*» – «*предположение*» [4] и в рассматриваемом случае означающий научное предположение, выдвигаемое для объяснения указанных электрофизических процессов в атмосферном облаке.



Рис. 1. Общий вид грозных электрических разрядов, происходящих в зоне вулканического горячего дымового извержения, содержащего в пепле мелкие твердые частицы [9]

**1. Постановка задачи.** Рассмотрим крупномасштабную область воздушной атмосферы (тропосферы) Земли в теплый весенне-летний период года, в которой возможно образование слоисто-дождевых, кучево-дождевых и грозных облаков. Для этого считаем, что в данной области присутствуют: во-первых, водяной пар и мелкие капли воды; во-вторых, мелкие твердые диэлектрические частицы (например, из диоксидов кремния – кварца); в-третьих, восходящие теплые и нисходящие холодные воздушные потоки; в-четвертых, мелкие кристаллы льда в виде снежинок и гранул. Возможные механизмы электризации в рассматриваемой области земной атмосферы мелких капель воды достаточно подробно рассмотрены в [3, 7]. В данной работе основной акцент будет сделан на возможную роль указанных твердых частиц на процессы образования, накопления и разделения электрических зарядов обеих полярностей первоначально в кучево-дождевом облаке, а затем и в грозном облаке. С этой целью принимаем, что движущиеся в теплом восходящем воздушном потоке мелкие твердые частицы имеют форму шара радиусом  $r_0$ . Допускаем, что усредненная концентрация (плотность) этих твердых частиц в атмосферном воздухе составляет  $N_0$ . Расчетные оценки процессов электризации рассматриваемых твердых диэлектрических частиц и накопления с их помощью объемного электрического заряда в атмосферном кучево-дождевом (грозном) облаке выполним для случая нормальных атмосферных условий (давление воздуха составляет  $1,013 \cdot 10^5$  Па, а его абсолютная температура  $T_0$  равна 273,15 К [10]). Эти условия близки к нижней границе уровня изотермы, в зоне которой начинают создаваться облачные заряды [3]. Требуется в принятом приближении рассмотреть обусловленные наличием движущихся в теплом восходящем воздушном потоке указанных твердых диэлектрических частиц возможные дополнительные механизмы возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в исследуемом вначале кучево-дождевом и далее в грозном облаке.

**2. Расчетная оценка процесса электризации твердых частиц в восходящем теплом воздушном потоке.** Результаты исследований, представленные в [3, 7], свидетельствуют о том, что процессам электризации в воздушной атмосфере нашей планеты свойствен биполярный характер. Кроме того, согласно данным из [3] ионный механизм электризации облачных частиц характерен для начальной стадии развития облаков в земной атмосфере. Контактный механизм электризации частиц является основным механизмом, приводящим к появлению в атмосферных облаках униполярно заряженных областей. Механизм электризации частиц во внешнем электрическом поле может существенно проявляться в атмосферных кучево-дождевых и грозных облаках. Исходя из результатов воздействия указанных механизмов электризации облачных частиц, подробно описанных в [3, 7], на перемещающиеся в восходящем теплом воздушном потоке исследуемые мелкодисперсные диэлектрические

включения сферической формы, ограничимся далее рассмотрением случая, когда принятая твердая частица радиусом  $r_0$  получила свободный электрический заряд  $q_0$  отрицательной полярности, равномерно распределенный по ее наружной сферической поверхности. Полагаем, что исследуемая отрицательно заряженная частица радиусом  $r_0$  при своем движении в восходящем теплом воздушном потоке из-за действия собственного радиального электрического поля способна подтянуть к своей наружной сферической поверхности радиально ориентированные по этому полю диполи поляризованных молекул воды (рис. 2). В итоге твердая сферическая частица с зарядом  $q_0$  будет снаружи окружена скоплением (микрооблачком) водяного пара и соответственно покрыта тонкой водяной пленкой. Такое состояние исследуемой заряженной твердой частицы радиусом  $r_0$  не будет противоречить ни одному из известных физических положений.

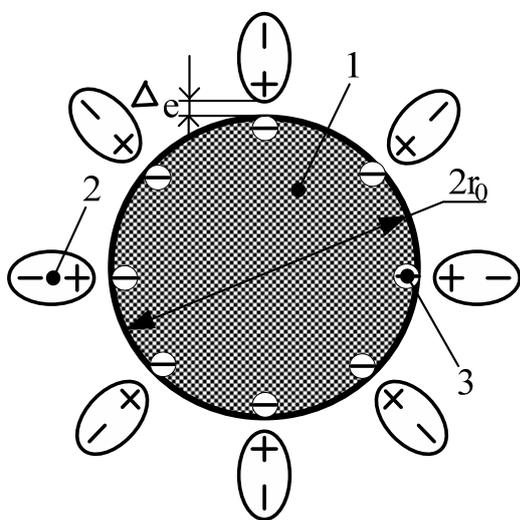


Рис. 2. Упрощенный вид отрицательно заряженной твердой сферической частицы, окруженной снаружи электронейтральными поляризованными молекулами воды (1 – твердая частица; 2 – молекулярный диполь воды; 3 – электрон)

Причем, как и в заряженной водяной сферической капле [3] наружная часть системы «частица-водяная пленка» будет иметь также отрицательный электрический заряд, но только не свободный, а связанный (см. рис. 2). На молекулярном уровне электрические заряды каждого диполя воды этой системы являются связанными и удерживаемыми внутримолекулярными кулоновскими силами [10]. Поэтому ни какой нейтрализации свободного заряда  $q_0$  твердой диэлектрической частицы радиусом  $r_0$  из-за присутствия вблизи нее электронейтральных молекул паров воды не произойдет. В соответствии с фундаментальными положениями электрофизики на внутренней границе системы «частица-водяная пленка» будет образовываться двойной электрический слой (ДЭС) толщиной  $\Delta_e$  (см. рис. 2) между электронами твердой частицы радиусом  $r_0$  и первым слоем молекулярных диполей воды. Связанный положительный заряд  $q_+$  каждого такого молекулярного диполя воды в зоне ДЭС будет равен  $10e_0$ , где  $e_0=1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – модуль

электрического заряда электрона [10]. Известно, что толщина  $\Delta_e$  ДЭС в образовавшейся системе «частица-водяная пленка» будет определяться в виде [10]:

$$\Delta_e = \left[ \varepsilon_0 k T_0 / (n_0 q_+^2) \right]^{1/2} = \left[ 10^{-2} \varepsilon_0 k T_0 / (n_0 e_0^2) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $n_0$  – концентрация (плотность) молекулярных диполей воды.

В случае, когда взвешенные в атмосферной пустоте (вакууме) молекулярные диполи воды удовлетворяют состоянию идеального газа их плотность  $n_0$  при используемых нормальных атмосферных условиях в первом приближении можно принять равной числу Лошмидта, численно равному  $N_L=2,68 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup> [10]. Тогда из (1) при  $T_0=273,15$  К,  $n_0 \approx 2,68 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup> и указанных выше мировых константах ( $\varepsilon_0$ ,  $k$  и  $e_0$ ) следует, что  $\Delta_e \approx 0,22 \cdot 10^{-10}$  м. Видно, что даже выполненная грубая расчетная численная оценка толщины  $\Delta_e$  ДЭС в рассматриваемой системе «частица-водяная пленка» не выходит за пределы разумных значений, соизмеримых с радиусом атома твердой диэлектрической частицы [10]. Кроме того, заметим, что радиус (длина) экранирования Дебая  $\Delta_D$  как для низкотемпературной плазмы, содержащей электроны, ионы и нейтральные атомы (молекулы), так и твердотельной «металлической плазмы» (электронейтрального вещества, состоящего из отрицательно заряженного «электронного газа» и ионизированных положительно заряженных атомов металла) по порядку величины соответствует найденному значению  $\Delta_e$  [10, 11]. Для большей убедительности в правоте расчетной оценки  $\Delta_e$  по (1) укажем, что радиус  $\Delta_D$  Дебая характеризует расстояние (линейный размер), на котором кулоновское поле любого заряда плазмы экранируется зарядом противоположного знака. Именно подобная ситуация и наблюдается в указанном ДЭС исследуемой системы «частица-водяная пленка» (см. рис. 2).

Вот теперь, используя образовавшуюся в восходящем теплом воздушном потоке электростатическую систему «частица-водяная пленка» с ее ДЭС, можно возвратиться к расчетной оценке отрицательного электрического заряда  $q_0$ , возникающего на наружной сферической поверхности движущейся твердой диэлектрической частицы радиусом  $r_0$  за счет ее электризации в воздушной атмосфере. Применив положения известной теории ДЭС [3, 10], для величины электрического заряда  $q_0$  твердой частицы, входящей в состав системы «частица-водяная пленка», находим:

$$q_0 = 4\pi\varepsilon_0 r_0 \varphi_0, \quad (2)$$

где  $\varphi_0$  – электрокинетический потенциал Гельмгольца (в случае использования в рассматриваемой электростатической системе чистой воды  $\varphi_0 = 0,25$  В [3]).

Из (2) видно, что для расчетной оценки величины заряда  $q_0$  на наружной поверхности электризуемой в восходящем теплом воздушном потоке земной атмосферы твердой диэлектрической частицы необходимо задаваться численным значением ее радиуса  $r_0$ . Согласно [3] в слоисто-дождевых и кучево-дождевых облаках могут присутствовать твердые частицы ра-

диусом  $r_0$ , составляющим (5–10) мкм. При  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м и  $\varphi_0 = 0,25$  В из (2) получаем, что заряд электризации твердой диэлектрической частицы в восходящем теплом воздушном атмосферном потоке по модулю будет численно составлять примерно  $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл. Такая величина отрицательного электрического заряда  $q_0$  твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0 \approx 10$  мкм хорошо согласуется с данными, приведенными в [3] и характерными для контактного механизма заряда капель чистой воды в восходящем теплом воздушном потоке земной атмосферы. Приняв, что в первом приближении объемная плотность  $N_0$  твердых диэлектрических частиц в атмосферном облаке по порядку величины равна концентрации в нем водяных капель и численно составляет около  $10^8$  м<sup>-3</sup> [3], для объемной плотности  $\sigma_V$  электрического заряда в грозном облаке, обусловленной присутствием в нем электризованных твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0$ , воспользуемся следующим расчетным соотношением:

$$\sigma_V = q_0 N_0. \quad (3)$$

Из (3) при  $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл и  $N_0 \approx 10^8$  м<sup>-3</sup> следует, что в рассматриваемом случае  $\sigma_V \approx 2,78 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup>. Это полученное с учетом (2) и (3) численное значение  $\sigma_V$  соответствует экспериментальным данным для среднего значения плотности объемного заряда в грозном облаке [3, 7]. Например, при средних габаритных размерах грозного облака 1 км × 1 км × 4 км (размеры по горизонтали и размер по высоте) и его соответствующем объеме  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> указанное значение  $\sigma_V \approx 2,78 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup> вызывает появление в данном облаке суммарного электрического заряда  $q_\Sigma \approx \sigma_V V_0$ , по модулю равного примерно 111 Кл. Данный показатель заряда  $q_\Sigma$  хорошо коррелирует с известными вероятностными экспериментальными данными, характеризующими электрическую мощь такого облака [3, 5–7].

Исходя из (2), для поверхностной плотности  $\sigma_S$  заряда на твердой диэлектрической частице радиусом  $r_0$ , электризуемой в воздушной атмосфере, имеем:

$$\sigma_S = q_0 / (4\pi r_0^2) = \varepsilon_0 r_0^{-1} \varphi_0. \quad (4)$$

При  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м и  $\varphi_0 = 0,25$  В из (4) находим, что величина  $\sigma_S$  для исследуемой твердой диэлектрической частицы сферической формы принимает численное значение, равное примерно  $2,21 \cdot 10^{-7}$  Кл/м<sup>2</sup>. Заметим, что данное расчетное значение  $\sigma_S$  практически на два порядка превышает усредненную поверхностную плотность отрицательного заряда планеты Земля, составляющую около  $10^{-9}$  Кл/м<sup>2</sup> [3]. Учитывая (4) и [10], для напряженности  $E_0$  электростатического поля вблизи наэлектризованной в теплом восходящем воздушном потоке атмосферы Земли поверхности твердой диэлектрической частицы радиусом  $r_0$  находим:

$$E_0 = \sigma_S / \varepsilon_0 = \varphi_0 / r_0. \quad (5)$$

Из (5) при  $\varphi_0 = 0,25$  В для твердой диэлектрической частицы радиусом  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м, прошедшей процесс атмосферной электризации, получаем, что вблизи ее отрицательно заряженной сферической поверхности напряженность  $E_0$  электростатического поля

может численно составлять значение, равное примерно 25 кВ/м. Вполне вероятно, что такое электрическое поле способно подтянуть к поверхности исследуемой частицы диполи поляризованных молекул воды. Что касается значений средней напряженности электрического поля в слоисто-дождевых и кучево-дождевых облаках, то согласно прямым опытным измерениям с помощью летающей непосредственно в облаках электрофизической лаборатории она может в предгрозной период (до перехода указанных облаков в грозные) численно достигать уровня (20–30) кВ/м [3, 7]. Эти данные могут указывать на правомерность расчетной оценки по (5) величины  $E_0$  вблизи частицы до образования ею системы «частица-водяная пленка».

Вероятные численные значения напряженности  $E_e$  электростатического поля в зоне ДЭС системы «частица-водяная пленка» могут быть приближенно определены из следующего расчетного выражения:

$$E_e = \varphi_0 / \Delta_e. \quad (6)$$

Тогда из (6) при  $\varphi_0 = 0,25$  В и  $\Delta_e \approx 0,22 \cdot 10^{-10}$  м, вытекающей из приближенного расчета по (1) при принятых исходных данных ( $T_0 = 273,15$  К;  $n_0 \approx 2,68 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup> [10]), следует, что в зоне рассматриваемого ДЭС напряженность  $E_e$  электростатического поля будет достигать огромного численного значения, составляющего около  $1,13 \cdot 10^{10}$  В/м. Такой уровень  $E_e$  указывает на то, что в зоне ДЭС исследуемой системы «частица-водяная пленка» возникает сверхсильное электрическое поле, определяющее накапливаемую атмосферным грозным облаком электрическую энергию  $W_e$ .

**3. Феноменологическое описание процессов накопления и разделения электрических зарядов в атмосферном облаке с твердыми частицами.** Поднятые в земную тропосферу восходящим теплым воздушным потоком заряженные твердые диэлектрические частицы радиусом  $r_0$ , экранированные снаружи защитной тонкой водяной пленкой и одновременно образующие вместе с ней ДЭС с его сверхсильным электростатическим полем, будут способствовать объемному накоплению в рассматриваемых слоисто-дождевых и кучево-дождевых облаках электрических зарядов с их объемной плотностью  $\sigma_V$ . По-моему мнению, при отсутствии у одноименно заряженных твердых частицах окружающего их защитного электронейтрального микрооблачка из молекулярных диполей воды возможны физические затруднения в их направленном концентрированном сборе в тропосфере. Одними из их проявлений могут быть преждевременные внутриоблачные электрические разряды (как в вулканических дымовых извержениях), приводящие к частичной нейтрализации зарядов электризации мелких твердых частиц. Этому обстоятельству будет способствовать и то, что с учетом отмеченного ранее биполярного характера электризации твердых диэлектрических частиц в воздушной атмосфере [3] в указанных облаках будут вероятно присутствовать крупномасштабные области с избыточными отрицательными (с избытком электронов) и положительными (с недостатком электронов) электрическими зарядами.

С одной стороны, из теории и практики атмосферного электричества известно, что верхняя часть указанных облаков находится в зоне действия низких изотерм (до минус 40 °С) [3, 7]. Естественно, что в этой части рассматриваемых облаков будут происходить процессы кристаллизации воды (в том числе и тонкой водяной пленки, покрывающей заряженную твердую диэлектрическую частицу). А раз так, то данная замерзающая водяная пленка из-за своего объемного расширения в процессе кристаллизации будет разрушаться (почти взрываться, как и замерзающая капля воды [3]) и покидать наружную поверхность твердой диэлектрической частицы, имевшей до этого избыточный отрицательный электрический заряд  $q_0$ . С другой стороны, из теории и практики атмосферного электричества известно и то, что образующиеся из электронейтральной чистой воды с ее молекулярными поляризованными диполями (в том числе и тонкой водяной пленки, покрывающей исследуемую заряженную твердую диэлектрическую частицу) кристаллы льда имеют отрицательный электрический потенциал и соответственно избыточный отрицательный заряд (избыток электронов) по отношению к воде (эффект Воркмана-Рейнольдса) [3, 10]. На появление этого электрического потенциала при преобразовании в замерзающей воде жидкой и твердую фазу вещества верхними слоями тропосферы выполняется определенная работа. Исходя из фундаментального закона природы о сохранении электрического заряда [10], можно обоснованно предположить, что при описываемом процессе разделения электрических зарядов в верхней переохлажденной части атмосферного облака на примере одной электростатической системы «частица-водяная пленка» освобождающаяся от водяной пленки сферическая поверхность твердой диэлектрической частицы останется отрицательно заряженной с зарядом  $q_0$ . Все это вместе (исчезновение с заряженной твердой частицы экранирующей водяной пленки и пребывание на ней (этой частице) отрицательного заряда  $q_0$ , а также наличие из-за кристаллизации паров воды в переохлажденной части облака отрицательно заряженных снежинок и гранул) будет способствовать усилению напряженности электрического поля в рассматриваемой части атмосферного облака.

Из прикладной электрофизики, связанной с изучением атмосферного электричества, известно, что на стадии перехода кучево-дождевого облака в грозное облако в его средней и нижней частях должны активно происходить процессы, сопровождающиеся движением теплых восходящих и холодных нисходящих воздушных масс, а также наличием выпадения дождевых осадков [3]. Именно при этих условиях наблюдается существенное усиление напряженности электрического поля внутри грозного облака, достигающей уровня около 0,4 МВ/м и более [3], при котором возможно развитие электроразрядных процессов как внутри облака, так и вне его, в том числе и в сторону земной поверхности. Рассматриваемая в рамках предлагаемой гипотезы о природе дополнительных меха-

низмов развития электрофизических процессов в атмосферных облаках электростатическая система «частица-водяная пленка» как раз и может физически объяснить существенное усиление напряженности электрического поля внутри и вне грозного облака в случае начала активного выделения в нем накопившихся паров влаги и выпадения из него дождевых осадков. Именно в этом случае происходит нарушение экранирования дипольными слоями паров воды заряженных твердых диэлектрических частиц (своего рода разэкранировка электрического поля этих частиц), несущих на себе избыточный заряд облака  $q_\Sigma$  и обеспечивающих с усредненной объемной плотностью  $\sigma_V$  по атмосферному облаку в своей совокупности формирование электростатического поля грозного облака.

**4. Расчетная оценка напряженности электрического поля внутри и вне грозного облака с твердыми частицами.** Для данной оценки воспользуемся упрощенной расчетной моделью грозного облака, имеющего форму шара радиусом  $R_0$ , внутри которого равномерно распределены с объемной плотностью  $\sigma_V \approx 2,78 \cdot 10^{-8}$  Кл/м<sup>3</sup> электрические заряды  $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл отдельных мелких твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м. Примем, что суммарный электрический заряд этих частиц  $q_\Sigma \approx 111$  Кл, как и в разделе 2, сосредоточен в грозном облаке объемом  $V_0 = 4\pi R_0^3/3 = 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> и соответственно радиусом, равным примерно  $R_0 \approx 985$  м. Исходя из применения теоремы Остроградского-Гаусса [10], для напряженности  $E_r$  электростатического поля внутри принятой расчетной модели грозного облака сферической формы при текущем значении радиуса  $r < R_0$  находим:

$$E_r = q_\Sigma r / (4\pi \epsilon_0 R_0^3). \quad (7)$$

Из (7) при  $R_0 \approx 985$  м,  $r \approx R_0/2 \approx 492,5$  м и  $q_\Sigma \approx 111$  Кл получаем, что в исследуемом случае  $E_r \approx 0,514$  МВ/м. Видно, что внутри грозного облака, содержащего освобожденные за счет выпадения дождевых осадков от электронейтральных водяных паров (пленок) ранее заряженные путем электризации в теплом восходящем воздушном потоке твердые диэлектрические частицы радиусом  $r_0 \approx 10$  мкм с их объемной плотностью  $N_0 \approx 10^8$  м<sup>-3</sup> в земной атмосфере, можно достигать критических значений напряженности  $E_r$  электростатического поля, характерных согласно [3, 7] для электроразрядных процессов в исследуемых видах облаков.

Для напряженности  $E_R$  электростатического поля на внешней границе ( $r=R_0$ ) принятой расчетной модели грозного облака из теории электростатики имеем:

$$E_R = q_\Sigma / (4\pi \epsilon_0 R_0^2). \quad (8)$$

Подставив в (8) принятые исходные данные ( $q_\Sigma \approx 111$  Кл;  $R_0 \approx 985$  м), для искомой напряженности  $E_R$  электрического поля на внешней границе (краю) рассматриваемой модели грозного облака получаем численное значение, равное примерно 1,03 МВ/м. Полученные с помощью (8) и предлагаемых дополнительных механизмов формирования и протекания электрофизических процессов в атмосферных облаках

количественные расчетные данные для  $E_R$  указывают на возможность развития с внешней границы описанной модели грозового облака электронных лавин [3], являющихся предвестником искрового пробоя в атмосфере длинного воздушного промежутка (молнии).

**5. Расчетная оценка электрического потенциала грозового облака с твердыми частицами.** Из электростатики известно, что электрический потенциал  $\varphi_R$  вне рассматриваемой упрощенной расчетной модели грозового облака сферической формы (при  $r \geq R_0$ ) с суммарным электрическим зарядом  $q_\Sigma$ , содержащей равномерно распределенные по ее объему заряды  $q_0$  мелких твердых частиц, может быть рассчитан по следующей приближенной формуле [12]:

$$\varphi_R = q_\Sigma / (4\pi\epsilon_0 r). \quad (9)$$

Из (9) при  $r \approx R_0 \approx 985$  м и  $q_\Sigma \approx 111$  Кл определяем, что на внешней границе исследуемого грозового облака  $\varphi_R \approx 1,01 \cdot 10^9$  В. Возможно, что из-за выбранных нами геометрической формы расчетной области грозового облака и количественных показателей объемной плотности  $N_0$  в нем твердых диэлектрических частиц порядка  $10^8$  м<sup>-3</sup> численные значения электрического потенциала  $\varphi_R$  по (9) оказываются завышенными. Так, согласно [13] разница электрических потенциалов между грозовым облаком и землей может достигать уровня около 100 МВ. Приняв в оценочных расчетах по (3) объемной плотности  $\sigma_V$  электрического заряда для рассматриваемого грозового облака объемом  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> ( $R_0 \approx 985$  м) и его суммарного электрического заряда  $q_\Sigma$  величину  $N_0 \approx 10^7$  м<sup>-3</sup> (на порядок меньше возможной объемной плотности в атмосферном облаке мелких водяных капель), можно легко прийти согласно (9) к расчетному уровню электрического потенциала грозового облака  $\varphi_R \approx 101$  МВ, практически указанному в [13]. Данное значение  $\varphi_R$  представляется автору более правдоподобным для исследуемого грозового облака. Такое откорректированное значение  $N_0$  повлечет за собой соответственно и уменьшение в десять раз таких ранее приведенных электрофизических характеристик для облака как  $\sigma_V$ ,  $q_\Sigma$ ,  $E_r$  и  $E_R$ . В этом случае предлагаемые здесь электрофизические механизмы формирования и развития в земной тропосфере грозового облака действительно окажутся дополнительными к известным механизмам накопления в нем электрических зарядов, основанным на атмосферной электризации мелких водяных капель в теплых восходящих воздушных потоках. Тем не менее, полученные выше оценочные расчетные значения  $\varphi_R$  свидетельствует о том, что наэлектризованные в теплом восходящем воздушном потоке мелкие ( $r_0 \approx 10$  мкм) твердые диэлектрические частицы с объемной плотностью порядка  $N_0 \approx (10^7 - 10^8)$  м<sup>-3</sup> и зарядом  $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$  Кл за счет внушительного объема грозового облака (порядка  $4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>) способны благодаря процессам теплового обмена в атмосфере, выполнению в ней закономерностей термодинамики, приводящих к появлению в земной тропосфере больших зон различного давления и движению в ней огромных воздушных масс, сформировывать в атмосфере весь-

ма протяженные электрически заряженные облачные области, несущие сверхвысокий электрический потенциал и вызывающие развитие грозовых разрядов.

**6. Расчетная оценка запасаемой грозовым облаком с твердыми частицами электрической энергии.** Данную оценку выполним исходя из того положения, что электрическая энергия  $W_e$  атмосферного кучево-дождевого облака, перед его переходом в стадию грозового облака, запасается лишь в многочисленной совокупности исследуемых нами электростатических систем «частица-водяная пленка». В этой связи приближенный расчет величины  $W_e$  при заданной объемной плотности  $N_0$  рассматриваемых электростатических систем в предгрозном облаке общим объемом  $V_0$  будет сводиться к определению электрической энергии  $W_{e0}$ , сосредоточенной в их одном ДЭС толщиной  $\Delta_e$ . Для величины  $W_{e0}$  можно записать следующее приближенное расчетное соотношение:

$$W_{e0} = 2\pi\epsilon_0\varphi_0^2 r_0^2 / \Delta_e. \quad (10)$$

Тогда из (10) при  $\varphi_0 = 0,25$  В,  $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$  м и  $\Delta_e \approx 0,22 \cdot 10^{-10}$  м находим, что в одной электростатической системе сферической формы «частица-водяная пленка» (в ее ДЭС со сверхсильным электрическим полем) запасается электрическая энергия, равная примерно  $W_{e0} \approx 1,58 \cdot 10^{-11}$  Дж. С учетом (10) для объемной плотности  $W_{eV}$  электрической энергии в предгрозном облаке с мелкими твердыми диэлектрическими частицами радиусом  $r_0$ , наэлектризованными в теплом восходящем воздушном потоке атмосферы, имеем:

$$W_{eV} = W_{e0} N_0. \quad (11)$$

Из (11) при  $W_{e0} \approx 1,58 \cdot 10^{-11}$  Дж и  $N_0 \approx 10^7$  м<sup>-3</sup> следует, что в грозовом облаке с мелкими (радиусом  $r_0 \approx 10$  мкм) твердыми заряженными путем атмосферной электризации диэлектрическими частицами может достигаться объемная плотность  $W_{eV}$  электрической энергии, численно равная около  $1,58 \cdot 10^{-4}$  Дж/м<sup>3</sup>. В результате для электрической энергии  $W_e$ , запасаемой в исследуемом грозовом облаке общим объемом  $V_0$ , можно записать следующее расчетное соотношение:

$$W_e = W_{eV} V_0. \quad (12)$$

При  $W_{eV} \approx 1,58 \cdot 10^{-4}$  Дж/м<sup>3</sup> и  $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> из (12) получаем, что в грозовом облаке заданных нами размеров, при формировании которого были использованы новые дополнительные механизмы образования, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках, может запастись электрическая энергия  $W_e$ , численно достигающая в рассматриваемом расчетном случае значения 0,632 МДж. Данное значение  $W_e$  является сравнительно небольшим. Здесь следует подчеркнуть то, что при расчетной оценке  $W_e$  нами не были учтены электрические заряды с их энергетикой, образуемые в грозовом облаке при известных процессах электризации мелких водяных капель и кристаллизации облачных водяных паров [3]. При первоначально принятой объемной плотности в облаке мелких твердых частиц  $N_0 \approx 10^8$  м<sup>-3</sup> запасаемая электрическая энергия  $W_e$  в указанной сфери-

ческой модели грозового облака ( $V_0 \approx 4 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ ) с учетом предлагаемой гипотезы численно составит около 6,32 МДж.

#### Выводы.

1. Представлена новая гипотеза с научным обоснованием по возможному существованию дополнительных механизмов образования, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках нашей планеты, базирующихся на электризации в теплых восходящих воздушных потоках мелких круглых твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0$ , попадающих в воздушную атмосферу с поверхности земли и из дымовых выбросов промышленных предприятий большинства стран мира.

2. Расчетным путем показано, что предложенные дополнительные механизмы возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных слоисто-дождевых, кучево-дождевых и грозовых облаках способны обеспечивать достижение в указанных видах облаков таких значений объемной плотности  $\sigma_V$  зарядов, суммарного запасаемого в них электрического заряда  $q_\Sigma$  и напряженностей  $E_r$  и  $E_R$  электростатического поля внутри и на внешней границе подобных облаков, которые соответствуют современным экспериментальным данным из области атмосферного электричества.

3. Выполненные с учетом предложенной гипотезы расчетные оценки электрического потенциала  $\varphi_R$  в сферической модели атмосферного грозового облака внешним радиусом  $R_0 \approx 985 \text{ м}$  и запасаемой в нем электрической энергии  $W_e$  указывают на то, что атмосферная электризация входящих в его состав мелких твердых диэлектрических частиц радиусом  $r_0 \approx 10 \text{ мкм}$  с их объемной плотностью  $N_0 \approx 10^7 \text{ м}^{-3}$  в таком облаке способна обеспечивать появление на нем сверхвысокого значения электрического потенциала  $\varphi_R$  (до  $1,01 \cdot 10^8 \text{ В}$ ) и накопление в нем весьма большого запаса электрической энергии  $W_e$  (до  $0,632 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ ). При  $N_0 \approx 10^8 \text{ м}^{-3}$  рассматриваемые значения оказываются соответственно равными  $1,01 \cdot 10^9 \text{ В}$  и  $6,32 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ .

4. Рассмотренные электрофизические процессы и новые дополнительные механизмы возникновения и накопления электрических зарядов в атмосферных облаках могут оказаться полезными при построении теории грозы в природных мелкодисперсных средах с заряжающимися за счет контактной электризации мелкими твердыми частицами, характерных для песчаных бурь и вулканических дымовых извержений, когда в них объемная плотность  $N_0$  мелких твердых диэлектрических частиц составляет не менее  $10^8 \text{ м}^{-3}$ .

5. Предложенные новые дополнительные электрофизические механизмы формирования электрических зарядов в атмосферных облаках Земли совместно с известными подобными механизмами, основанными на комплексной электризации в теплом восходящем воздушном потоке мелких круглых водяных капель, будут способствовать дальнейшему развитию природы атмосферного электричества и успешному решению глобальной проблемы молниезащиты на нашей планете технических и биологических объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радовский М.И. Ломоносов и его исследования в области атмосферного электричества // *Электричество*. – 1939. – №1. – С. 69-72.
2. Капица П.Л. Научная деятельность В. Франклина // *Успехи физических наук*. – 1956. – Т.58. – Вып. 2. – С. 169-182. doi: 10.3367/ufnr.0058.195602a.0169.
3. Бортник И.М., Белогловский А.А., Верещагин И.П., Вершинин Ю.Н., Калинин А.В., Кучинский Г.С., Ларионов В.П., Монастырский А.Е., Орлов А.В., Темников А.Г., Пинталь Ю.С., Сергеев Ю.Г., Соколова М.В. *Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для ВУЗов / Под общей ред. проф. И.П. Верещагина*. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2010. – 704 с.
4. Большой иллюстрированный словарь иностранных слов. – М.: Русские словари, 2004. – 957 с.
5. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. *Физика молнии и молниезащита*. – М.: Физматлит, 2001. – 319 с.
6. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards // *Proceedings of the IEEE*. – 1988. – vol.76. – no.12. – pp. 1548-1565. doi: 10.1109/5.16349.
7. Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. *Молния и молниезащита*. – М.: Знак, 2003. – 330 с.
8. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. – Х.: НТМТ, 2010. – 292 с.
9. <http://www.astronet.ru/db/msg/1244664>.
10. Кузьмичев В.Е. *Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский*. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.
11. Баранов М.И. Расчетная оценка толщины слоя индукционных электрических зарядов в металлическом проводнике // *Электротехника и электромеханика*. – 2011. – №4. – С. 56-58. doi: 10.20998/2074-272X.2011.4.11.
12. Яворский Б.М., Детлаф А.А. *Справочник по физике*. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
13. Бржезицкий В.О., Исакова А.В., Рудаков В.В. та ін. *Техніка і електрофізика високих напруг: Навч. посібник / За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова*. – Х.: НТУ «ХПІ». – Торнадо, 2005. – 930 с.

#### REFERENCES

1. Radovskiy M.I. Lomonosov and his researches in area of atmospheric electricity. *Electricity*, 1939, no.1, pp. 69-72. (Rus).
2. Kapitza P.L. *Nauchnaja dejatel'nost' V. Franklina* [Scientific activity of V. Franklin]. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 1956, vol.58, no.2, pp. 169-182. (Rus). doi: 10.3367/ufnr.0058.195602a.0169.
3. Bortnik I.M., Beloglovskiy A.A., Vereshchagin I.P., Verшинin Yu.N., Kalinin A.V., Kuchinskiy G.S., Larionov V.P., Monastyrskiy A.E., Orlov A.V., Temnikov A.G., Pintal' Yu.S., Sergeev Yu.G., Sokolova M.V. *Elektrofizicheskie osnovy tekhniki vysokih naprjazhenij* [Electrophysics bases of technique of high voltage]. Moscow, Publishing house of MEI, 2010. 704 p. (Rus).
4. *Bol'shoj illjustrirovannyj slovar' inostrannyh slov* [Large illustrated dictionary of foreign words]. Moscow, Russkie slovari Publ., 2004. 957 p. (Rus).
5. Bazelyan E.M., Raiser Yu.P. *Fizyka molnii i molnyezashchita* [The physics of lightning and lightning protection]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 319 p. (Rus).
6. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol.76, no.12, pp. 1548-1565. doi: 10.1109/5.16349.
7. Kuzhekin I.P., Larionov V.P., Prohorov E.N. *Molnija i molniezashchita* [Lightning and protection from lightning]. Moscow, Znak Publ., 2003. 330 p. (Rus).

8. Kravchenko V.I. *Molniya. Elektromagnitny faktory i porazhayushchie vozdeystviya na tekhnicheskie sredstva* [Lightning. Electromagnetic factors and their impact on the striking technical objects]. Kharkov, NTMT Publ., 2010. 292 p. (Rus).
9. Available at: <http://www.astronet.ru/db/msg/1244664> (accessed 15 July 2012). (Rus).
10. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
11. Baranov M.I. Estimation of induction electric charges thickness in a metallic conductor. *Electrical engineering & electro-mechanics*, 2011, no.4, pp. 56-58. (Rus). doi: **10.20998/2074-272X.2011.4.11**.
12. Javorskij B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 624 p. (Rus).
13. Brzhezitskiy V.A., Isakova A.V., Rudakov V.V. *Tekhnika i elektrofizyka vysokikh napruh* [Technics and Electrophysics of High Voltages]. Kharkov, Tornado Publ., 2005. 930 p. (Ukr).

Поступила (received) 15.11.2017

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., з.л.н.с.,  
НИПКИ «Молния»  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone +38 057 7076841,  
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

M.I. Baranov  
Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

**New hypothesis and electrophysics nature of additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in the atmospheric clouds of Earth.**

**Purpose.** Development of new hypothesis about the possible additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in atmospheric clouds, containing shallow dispersible drops of water, shallow particulate dielectric matters and crystals of ice. **Methodology.** Electrophysics bases of technique of high voltage, theoretical bases of the electrical engineering, theoretical electrophysics, theory of the electromagnetic field, technique of the high electric and magnetic

fields. **Results.** Pulled out and grounded new scientific supposition, related to possible existence in earthly troposphere of additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in the atmospheric clouds of Earth, being based on electrization in the warm ascending currents of air of shallow round particulate dielectric matters, getting in an air atmosphere from a terrene and from the smoke extras of industrial enterprises. By a calculation a way it is shown that the offered additional electrophysics mechanisms are able to provide achievement in the atmospheric clouds of such values of volume closeness of charges, total electric charge and tension of the electrostatic field stocked in them inwardly and on the external border of storm clouds which correspond modern experimental information from an area atmospheric electricity. The calculation estimations of levels of electric potential and stocked electric energy executed on the basis of the offered hypothesis in storm clouds specify on possibility of receipt in them of ever higher electric potentials and large supplies of electric energy. The obtained results are supplemented by the known approaches of forming and development in earthly troposphere of the electric charged atmospheric clouds, being based on electrization in the warm ascending streams of air the masses of shallow round aquatic drops. **Originality.** First on the basis of the well-known theses of technique and electrophysics of high voltage the important role of shallow round particulate dielectric matters, electrifiable in the warm ascending currents of air of troposphere is scientifically grounded, in the processes of origin, accumulation and division of electric charges in the stratified-rain, heap rain and storm clouds of Earth. **Practical value.** Application of in practice findings will allow to deepen scientific and technical knowledge of humanity in area of nature of atmospheric electricity, will be instrumental in further development of physics of linear lightning, decision of global problem of lightning protection of earthly technosphere, and also development of the specified approaches at description of the scantily explored people electrophysics phenomena and theories of thunderstorm at sandy storms in the numerous deserts of the world and powerful smoke eruptions of volcanoes on Earth. References 13, figures 2.

**Key words:** atmospheric electricity, new mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in atmospheric clouds, hypothesis, calculation, experimental data.