

УДК 621.3.015.52 : 621.3.022

М.И. БАРАНОВ, Л.В. ВАВРИВ

НОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В ОБЛАКАХ ТРОПОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Представлены результаты теоретических исследований физических процессов, происходящих в тропосфере Земли и приводящих к дополнительным механизмам возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных кучево-дождевых и грозовых облаках. В основу данных физических механизмов положены процессы электризации в теплых восходящих воздушных потоках мелких твердых диэлектрических частиц, попадающих в атмосферу с земной поверхности и при дымовых выбросах промышленных предприятий и имеющих объемную плотность, соизмеримую с объемной плотностью мелких водяных капель. Расчетным путем показано, что предлагаемые дополнительные физические механизмы способны обеспечивать достижение в атмосферных облаках экспериментально подтвержденных ранее уровней объемной плотности облачных электрических зарядов, суммарного запасаемого в них электрического заряда и напряженности электрического поля. Полученные данные будут способствовать дальнейшему развитию природы атмосферного электричества.

Ключевые слова: тропосфера Земли, атмосферное электричество, физические механизмы формирования электрических зарядов в облаках, результаты расчетов и опытных наблюдений облачных зарядов.

М.І. БАРАНОВ, Л.В. ВАВРИВ

НОВІ ФІЗИЧНІ МЕХАНІЗМИ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЗАРЯДІВ В ХМАРАХ ТРОПОСФЕРИ ЗЕМЛІ

Представлені результати теоретичних досліджень фізичних процесів, що відбуваються в тропосфері Землі і приводять до додаткових механізмів виникнення, накопичення і розділення електричних зарядів в атмосферних купчасто-дошових і грозових хмарах. У основу даних фізичних механізмів покладені процеси електризації в теплих висхідних повітряних потоках дрібних твердих діелектричних частинок, що потрапляють в атмосферу із земної поверхні і при димових викидах промислових підприємств і що мають об'ємну щільність, сумірну з об'ємною щільністю дрібних водяних крапель. Розрахунковим шляхом показано, що запропоновані додаткові фізичні механізми здатні забезпечувати досягнення в атмосферних хмарах експериментально підтверджених раніше рівнів об'ємної щільності хмарних електричних зарядів, сумарного електричного заряду, що запасється в них, і напруженості електричного поля. Отримані дані сприятимуть подальшому розвитку природи атмосферної електрики.

Ключові слова: тропосфера Землі, атмосферна електрика, фізичні механізми формування електричних зарядів в хмарах, результати розрахунків і дослідних спостережень хмарних зарядів.

M.I. BARANOV, L.V. VAVRIV

NEW PHYSICAL MECHANISMS OF FORMING OF ELECTRIC CHARGES ARE IN THE CLOUDS OF TROPOSPHERE OF EARTH

The results of theoretical researches of physical processes, what be going on in troposphere of Earth and resulting in the additional mechanisms of origin, accumulation and division of electric charges in atmospheric rain cumuli and storm clouds are presented. In basis of these physical mechanisms processes are fixed of electrization in the warm ascending currents of air of shallow particulate dielectric matters, getting's in an atmosphere from an earthly surface and at the smoke emissions of industrial enterprises and having a volume closeness, commensurable with the volume closeness of shallow aquatic drops. By a calculation a way it is rotined that the offered additional physical mechanisms are able to provide achievement in the atmospheric clouds of the levels of volume closeness of cloudy electric charges, total electric charge and tension of electric-field stocked in them experimentally confirmed before. Findings will be instrumental in further development of nature of atmospheric electricity.

Key words: troposphere of Earth, atmospheric electricity, physical mechanisms of forming of electric charges in clouds, results of calculations and experimental supervisions of cloudy charges.

Введение. В настоящее время при описании физических процессов, происходящих в тропосфере Земли и связанных с физикой возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках, практически учитываются лишь заряды, обусловленные процессами электризации мелких водяных капель в теплых восходящих воздушных потоках и их переходом в верхних низкотемпературных слоях облаков из жидкой (в виде паров воды) в твердую (в виде кристаллов льда) фазу [1-5]. Известно, что благо-

даря теплым восходящим потокам воздушных масс в тропосферу с поверхности земли и с дымовыми выбросами промышленных предприятий (особенно мощных тепловых электрических станций) поступают мелкие твердые диэлектрические частицы (например, из диоксида кремния – кварца) [1,4]. На возможность активной электризации в земной атмосфере подобных твердых частиц указывают природные опытные данные, характерные для песчаных бурь в пустынях мира и мощных дымовых извержений вулканов, сопровож-

© М.И. Баранов, Л.В. Ваврив, 2018

дающихся интенсивными грозовыми разрядами [5,6]. В этой связи несомненный научный и практический интерес представляют физические процессы, протекающие в земной атмосфере и непосредственно связанные с исследованием влияния присутствующих в большом количестве в тропосфере Земли мелких твердых диэлектрических частиц на динамику формирования электрических зарядов в атмосферных кучево-дождевых и грозовых облаках. Без изучения этих процессов, характерных для всех территорий нашей планеты, невозможно дальнейшее развитие физики формирования в земной тропосфере грозовых облаков, физики молнии, молниезащиты земной технической сферы и понимание роли электрически заряженных облаков в глобальной электрической цепи планеты Земля.

Целью статьи является теоретическое рассмотрение в первом приближении новых физических механизмов, приводящих к дополнительному возникновению, накоплению и разделению электрических зарядов обеих полярностей в кучево-дождевых и грозовых облаках земной тропосферы.

1. Постановка задачи. Рассмотрим крупномасштабную область в умеренных широтах воздушной атмосферы Земли в теплый весенне-летний период года, в которой возможно образование кучево-дождевых и грозовых облаков. Для этого считаем, что в этой области тропосферы присутствуют: во-первых, водяной пар и мелкие капли воды; во-вторых, мелкие твердые диэлектрические частицы; 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 [1,4]. В рамках данной работы основной акцент будет сделан на роль указанных твердых частиц на процессы образования, накопления и разделения электрических зарядов обеих полярностей первоначально в кучево-дождевом облаке, а затем и в грозовом облаке. С этой целью принимаем, что движущиеся в теплом восходящем воздушном потоке мелкие твердые частицы имеют форму шара радиусом r_0 , численно составляющим примерно $10 \cdot 10^{-6}$ м [1,4]. Допускаем, что усредненная концентрация (плотность) этих твердых частиц в атмосферном воздухе составляет величину N_0 , по порядку соизмеримую с объемной плотностью в нем мелких водяных капель и равную около $5 \cdot 10^7$ м⁻³ [1,4]. Расчетные оценки процессов электризации рассматриваемых твердых диэлектрических частиц и накопления с их помощью объемного электрического заряда в атмосферном кучево-дождевом и грозовом облаках 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 [7]). Эти атмосферные условия близки к нижней границе уровня изотермы, в зоне которой начинают создаваться облачные заряды тропосферы Земли [1]. В ходе изучения физических процессов в

земной тропосфере было установлено, что атмосферные грозовые облака появляются из кучево-дождевых облаков при выполнении ряда критических условий, сформулированных в [1]. При выполнении расчетных оценок напряженностей электрических полей в мелкодисперсной среде облаков и возникающих вне них электрических потенциалов воспользуемся упрощенной моделью атмосферного кучево-дождевого (грозового) облака, имеющего форму шара радиусом R_0 , внутри которого равномерно распределены с объемной плотностью σ_V электрические заряды q_0 отдельных мелких твердых диэлектрических частиц радиусом r_0 . Требуется в принятом приближении рассмотреть обусловленные наличием движущихся в теплом восходящем воздушном потоке мелких твердых диэлектрических частиц радиусом r_0 и объемной плотностью N_0 возможные дополнительные физические механизмы возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных первоначально кучево-дождевых и далее в грозовых облаках тропосферы Земли.

2. Расчетная оценка процесса электризации твердых частиц облака в восходящем теплом воздушном потоке земной тропосферы. Согласно [1-4] в воздушной атмосфере Земли наблюдаются следующие основные физические механизмы электризации присутствующих в ней мелких водяных капель и твердых частиц: а) ионный механизм электризации облачных частиц, характерный для начальной стадии развития облаков в тропосфере; б) контактный механизм электризации жидких и твердых частиц, являющийся основным механизмом, приводящим к появлению в атмосферных облаках униполярно заряженных областей; в) механизм электризации рассматриваемых частиц во внешнем электрическом поле, существенно проявляющийся в атмосферных кучево-дождевых и грозовых облаках. Исходя из результатов воздействия указанных механизмов электризации облачных частиц на перемещающиеся в восходящем теплом воздушном потоке мелкодисперсные диэлектрические частицы сферической формы, ограничимся далее рассмотрением случая, когда исследуемая твердая частица радиусом r_0 получила свободный электрический заряд q_0 отрицательной полярности, равномерно распределенный по ее наружной сферической поверхности. В рамках построения возможных новых физических механизмов формирования электрических облачных зарядов 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. В итоге твердая сферическая частица с зарядом q_0 будет снаружи окружена микрооблаком 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. Причем, как и в заряженной

сферической водяной капле [1], наружная часть системы «частица-водяная пленка» будет иметь также отрицательный электрический заряд, но только не свободный, а связанный. На молекулярном уровне электрические заряды каждого диполя воды этой системы являются связанными и удерживаемыми внутримолекулярными кулоновскими силами [7]. В этой связи 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 Δ_e между электронами твердой частицы радиусом r_0 и первым слоем молекулярных диполей воды. Связанный положительный заряд каждого молекулярного диполя воды согласно ее химической формуле в зоне ДЭС будет равен $q_+ = 10 e_0$, где $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль электрического заряда электрона [7]. Известно, что толщина Δ_e ДЭС в образовавшейся системе «частица-водяная пленка» будет определяться в виде [7]:

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

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 зоне рассматриваемого ДЭС.

Плотность n_0 молекулярных диполей воды в случае, когда взвешенные в атмосферной пустоте указанные диполи удовлетворяют состоянию идеального газа при используемых нормальных атмосферных условиях, в первом приближении можно принять равной числу Лошмидта, численно равному $N_L = 2,68 \cdot 10^{25}$ м⁻³ [7]. Тогда из (1) при $T_0 = 273,15$ К, $n_0 \approx 2,68 \cdot 10^{25}$ м⁻³ и указанных выше мировых константах ε_0 , k и e_0 следует, что $\Delta_e \approx 0,22 \cdot 10^{-10}$ м. Видно, что выполненная расчетная численная оценка толщины Δ_e ДЭС в рассматриваемой системе «частица-водяная пленка» не выходит за пределы значений, соизмеримых с радиусом атома твердой диэлектрической частицы [7]. Кроме того, следует отметить, что радиус (длина) Δ_D экранирования Дебая 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 Δ_e [7,8]. На правоту расчетной оценки Δ_e по (1) указывает и то, что радиус Δ_D Дебая согласно [7] характеризует расстояние (линейный размер), на котором кулоновское поле любого заряда плазмы экранируется зарядом противоположного знака. Именно подобная электрофизическая картина и наблюдается в указанном ДЭС исследуемой нами системы «частица-водяная пленка».

Используя далее образовавшуюся в восходящем теплом воздушном потоке электростатическую систему «частица-водяная пленка» с ее ДЭС, можно вы-

полнить расчетную оценку отрицательного электрического заряда q_0 , возникающего на наружной сферической поверхности движущейся твердой диэлектрической частицы радиусом r_0 за счет ее контактной электризации в воздушной атмосфере. Применяя положения известной теории ДЭС [1,7], 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 φ_0 – электрокинетический потенциал Гельмгольца (в случае использования в рассматриваемой электростатической системе чистой воды $\varphi_0 = 0,25$ В [1]).

Из (2) при $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$ м и $\varphi_0 \approx 0,25$ В получаем, что заряд из-за контактной 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 количественными данными, приведенными в [1] и характерными для контактного механизма заряда мелких капель воды в восходящем теплом воздушном потоке земной атмосферы.

Приняв в дальнейшем, что объемная плотность N_0 твердых диэлектрических частиц в формирующемся атмосферном кучево-дождевом (грозовом) облаке по порядку величины приближается к концентрации в нем водяных капель и численно составляет $5 \cdot 10^7$ м⁻³ [1], для объемной плотности σ_V электрического заряда в облаке, обусловленной присутствием в нем электризованных твердых диэлектрических частиц радиусом r_0 , воспользуемся следующим расчетным соотношением:

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

Тогда из (3) при $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$ Кл и $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$ м⁻³ следует, что в рассматриваемом случае $\sigma_V \approx 1,39 \cdot 10^{-8}$ Кл/м³. Это полученное с учетом (2) и (3) численное значение σ_V соответствует экспериментальным данным для среднего значения плотности объемного заряда в атмосферном грозовом облаке [1,4]. Для принятой расчетной модели грозового облака шарообразной формы ($R_0 \approx 985$ м) объемом $V_0 \approx 4\pi R_0^3 / 3 \approx 4 \cdot 10^9$ м³ полученное по (3) значение объемной плотности заряда $\sigma_V \approx 1,39 \cdot 10^{-8}$ Кл/м³ вызывает появление в данном облаке суммарного электрического заряда $q_\Sigma \approx \sigma_V V_0$, по модулю равного примерно 55,6 Кл. Полученный приближенным расчетным путем данный количественный показатель суммарного облачного электрического заряда q_Σ хорошо коррелирует с известными вероятностными экспериментальными данными, характеризующими электрическую мощь грозового облака, которая непосредственно проявляется и инструментально измеряется при сильноточных грозовых разрядах в электростатической системе «заряженное облако-земля» [1-4].

Заметим, что нормированные значения отрицательного заряда q_Σ грозового облака в соответствии с требованиями международного стандарта IEC 62305-1: 2010 [9] в зависимости от задаваемого уровня мол-

ниезащиты технических объектов, размещенных на земной поверхности, по модулю составляют соответственно для III-IV, II и I уровней молниезащиты 50, 75 и 100 Кл при нормированном допуске $\pm 20\%$, реализуемые в настоящее время при их испытаниях на молниестойкость в лабораторных условиях с помощью мощного высоковольтного генератора тока искусственной молнии [10].

2. Расчетная оценка основных полевых характеристик для твердых частиц облака. Исходя из (2), для поверхностной плотности σ_S электрического заряда на твердой диэлектрической частице радиусом r_0 , электризуемой в воздушной атмосфере Земли, 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 $\varphi_0 \approx 0,25$ В из (4) находим, что величина σ_S для исследуемой твердой диэлектрической частицы сферической формы принимает численное значение, равное примерно $2,21 \cdot 10^{-7}$ Кл/м². Видно, что полученное на основе (4) расчетное значение σ_S практически на два порядка превышает усредненную поверхностную плотность отрицательного заряда планеты Земля, составляющую около 10^{-9} Кл/м² [1].

Учитывая (4), для напряженности E_0 электростатического поля вблизи наэлектризованной в теплом восходящем воздушном потоке земной атмосферы поверхности исследуемой твердой диэлектрической частицы радиусом r_0 в формируемом облаке находим [7]:

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

Из (5) при $\varphi_0 \approx 0,25$ В для твердой диэлектрической частицы принятым радиусом $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$ м, прошедшей процесс атмосферной электризации, получаем, что вблизи ее отрицательно заряженной сферической поверхности до образования электростатической системы «частица-водяная пленка» напряженность E_0 электростатического поля может численно составлять значение, равное примерно 25 кВ/м. Теперь становится более ясным и вполне вероятным то используемое нами физическое предположение, что такое радиальное электрическое поле способно подтянуть к поверхности исследуемой частицы и удерживать вблизи нее диполи поляризованных молекул воды. В пользу правомерности приведенных расчетных оценок по (5) величины E_0 могут свидетельствовать значения средней напряженности электрического поля в кучево-дождевых облаках, полученные прямым опытным измерением с помощью аппаратуры летающей непосредственно в указанных облаках электрофизической авиационной лаборатории в предгрозовой период (до перехода рассматриваемых облаков в грозовые) и численно составляющие по модулю порядка 20...30 кВ/м [1,4].

Значения напряженности E_e электростатического поля в зоне ДЭС используемой при описании рассматриваемых электрофизических процессов системы «частица-водяная пленка» могут быть приближенно определены из следующего расчетного выражения:

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

Из (6) при $\varphi_0 \approx 0,25$ В и $\Delta_e \approx 0,22 \cdot 10^{-10}$ м, вытекающей из расчета по (1) толщины ДЭС при принятых исходных данных ($T_0 = 273,15$ К; $n_0 \approx 2,68 \cdot 10^{25}$ м⁻³ [7]), следует, что в зоне исследуемого ДЭС напряженность E_e электростатического поля будет достигать численного значения, составляющего около $1,13 \cdot 10^{10}$ В/м. Такой количественный уровень E_e указывает на то, что в зоне ДЭС рассматриваемой системы «частица-водяная пленка» возникает сверхсильное электрическое поле.

3. Феноменологическое описание физических 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 кучево-дождевых и грозовых облаках электрических зарядов с их объемной плотностью σ_V . По-нашему мнению, при отсутствии у одноименно заряженных твердых частиц окружающего их защитного электронейтрального микрооблака из молекулярных диполей воды возможны физические затруднения в их направленном концентрированном сборе в земной 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 еще до их попадания в рассматриваемые атмосферные облака. Этому обстоятельству будет способствовать и то, что с учетом биполярного характера электризации твердых диэлектрических частиц в воздушной атмосфере [1] 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) [1,4]. Поэтому 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 [1]) 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 исходной воде (эффект Воркмана-Рейнольдса) [1,7]. На появление этого электрического потенциала при преобразовании в замерзающей воде жидкой и твердую фазу вещества в верхних слоях тропосферы будет выполняться определенная работа. Исходя из фундаментального закона природы о сохранении электрического заряда [7], можно вполне обоснованно считать, 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 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 определенному усилению напряженности электрического поля в рассматриваемой части атмосферного облака и его переходу в грозовую стадию.

Из прикладной электрофизики, связанной с изучением атмосферного электричества, известно, что на стадии перехода кучево-дождевого облака в грозовое 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 [1]. Именно при этих условиях наблюдается существенное усиление напряженности электрического поля внутри грозового облака, достигающей уровня около 0,4 МВ/м и более [1], при котором возможно развитие электроразрядных процессов как внутри облака, так и вне его, в том числе и в сторону земной поверхности. Рассматриваемая в рамках исследуемых механизмов 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 атмосферного грозового 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 радиусом r_0 (своего рода разэкранировка электрического поля этих частиц с зарядом q_0), определяющих избыточный заряд q_Σ облака и обеспечивающих с усредненной объемной плотностью σ_V по облаку в своей совокупности формирование электростатического поля грозового облака.

4. Расчетная оценка напряженности электрического поля внутри и вне грозового облака с твердыми частицами. Для данной оценки воспользуемся принятой расчетной моделью грозового облака в земной тропосфере, имеющего форму шара радиусом

R_0 , внутри которого равномерно распределены с объемной плотностью $\sigma_V \approx 1,39 \cdot 10^{-8}$ Кл/м³ отрицательные электрические заряды, равные по модулю $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$ Кл, отдельных мелких твердых диэлектрических частиц радиусом $r_0 \approx 10 \cdot 10^{-6}$ м. Примем, что суммарный электрический заряд этих частиц, по модулю равный $q_\Sigma \approx 55,6$ Кл, сосредоточен в грозовом облаке объемом $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³ и соответственно радиусом, равным примерно $R_0 \approx 985$ м. Применив теорему Остроградского-Гаусса [7], для напряженности E_r электростатического поля внутри рассматриваемой упрощенной расчетной модели грозового облака сферической формы при текущем значении ее 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 $q_\Sigma \approx 55,6$ Кл получаем, что в исследуемом случае $E_r \approx 0,257$ МВ/м. Видно, что внутри грозового облака, содержащего освободившиеся за счет выпадения дождевых осадков от электронейтальных 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 $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$ м⁻³, напряженность E_r может приближаться к критическим значениям напряженности электростатического поля, характерным согласно [1,4] для электроразрядных процессов в исследуемых видах облаков тропосферы Земли.

Для напряженности E_R электростатического поля на внешней границе ($r = R_0$) принятой нами расчетной модели грозового облака из теории электростатики в приближенном виде имеем [11]:

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

Подставив в (8) принятые исходные данные ($q_\Sigma \approx 55,6$ Кл; $R_0 \approx 985$ м), для рассматриваемой напряженности E_R электрического поля на внешней границе (краю) исследуемой модели грозового облака получаем численное значение, равное примерно 0,515 МВ/м. Полученные с помощью (8) и предлагаемых дополнительных механизмов формирования и протекания электрофизических процессов в атмосферных облаках количественные расчетные данные для напряженности E_R электрического поля указывают на возможность развития с внешней границы описанной модели грозового облака электронных лавин [1], являющихся предвестником искрового пробоя в атмосфере длинного воздушного промежутка в системе «грозовое облако – земная поверхность» и возникновения линейной молнии.

5. Расчетная оценка электрического потенциала вне грозового облака с твердыми частицами. Исходя из законов электростатики, электрический потенциал ϕ_R вне рассматриваемой упрощенной расчетной модели грозового облака сферической формы внешним радиусом R_0 (при $r \geq R_0$) с суммарным электрическим зарядом q_Σ , содержащей равномерно распределенные по ее объему заряды q_0 мелких твердых диэлектрических частиц, может быть рассчитан по

формуле [11]:

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

Из (9) при $r \approx R_0 \approx 985$ м и $q_\Sigma \approx 55,6$ Кл определяем, что на внешней границе исследуемого грозового облака отрицательный электрический потенциал принимает численное значение, равное по модулю примерно $\varphi_R \approx 506$ МВ. Для сравнения этого расчетного значения φ_R с известными результатами определения φ_R вблизи атмосферных облаков отметим, что согласно [12] разница электрических потенциалов между грозовым облаком и земной поверхностью может достигать уровня, составляющего порядка 100 МВ. В пользу полученного по (9) для рассматриваемого случая ($q_\Sigma \approx 55,6$ Кл; $R_0 \approx 985$ м) расчетного численного значения электрического потенциала $\varphi_R \approx 506$ МВ грозового облака может указывать то, что напряженность $E_R \approx \varphi_R/R_0$ электрического поля на его краю при этом будет численно составлять значение, равное около 0,514 МВ/м. Это значение E_R отличается от соответствующего расчетного численного значения напряженности $E_R \approx 0,515$ МВ/м, найденного по (8), в пределах 1 %. Кроме того, приняв, что при $\varphi_R \approx 506$ МВ длина l_d разрядного воздушного промежутка в системе «грозовое облако-земля» составляет порядка 1000 м, для среднего значения в нем в предпробойной фазе напряженности E_d электрического поля получаем, что $E_d \approx \varphi_R/l_d \approx 0,506$ МВ/м. Этот результат также может указывать на достоверность полученного численного значения для потенциала φ_R .

Таким образом, полученные оценочные расчетные значения потенциала φ_R свидетельствуют о том, что наэлектризованные в теплых восходящих воздушных потоках мелкие ($r_0 \approx 10$ мкм) твердые диэлектрические частицы с объемной плотностью $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$ м⁻³ и зарядом $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$ Кл за счет большого объема грозового облака (порядка $V_0 \approx 4 \cdot 10^9$ м³) способны благодаря активным процессам теплового обмена в тропосфере, выполнению в ней закономерностей термодинамики, приводящих к появлению в земной атмосфере больших зон различного давления и движению в ней огромных воздушных масс, формировать в тропосфере Земли весьма протяженные электрически заряженные облачные области, несущие сверхвысокий электрический потенциал и вызывающие развитие грозных разрядов.

Выводы. 1. Представлены результаты приближенных теоретических исследований по научному обоснованию существования дополнительных механизмов образования, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных облаках Земли, базирующихся на электризации в теплых восходящих воздушных потоках мелких твердых диэлектрических частиц радиусом r_0 , попадающих в тропосферу с поверхности земли и из дымовых выбросов промышленных предприятий.

2. Расчетным путем в приближенном виде показано, что предложенные новые дополнительные механизмы возникновения, накопления и разделения электрических зарядов в атмосферных кучево-дождевых и

грозовых облаках способны обеспечивать достижение в указанных видах облаков земной тропосферы таких значений объемной плотности σ_V электрических зарядов обеих полярностей, суммарного запасаемого в них электрического заряда q_Σ и напряженностей E_r и E_R электростатического поля соответственно внутри и на внешней границе подобных облаков, которые соответствуют современным экспериментальным данным из области атмосферного электричества.

3. Выполненные расчетные оценки электрического потенциала φ_R вне принятой упрощенной сферической модели атмосферного грозового облака земной тропосферы внешним радиусом $R_0 \approx 985$ м указывают на то, что предварительная контактная электризация в теплых восходящих воздушных потоках входящих в его состав мелких твердых диэлектрических частиц радиусом $r_0 \approx 10$ мкм с их отрицательным электрическим зарядом $q_0 \approx 2,78 \cdot 10^{-16}$ Кл и объемной плотностью $N_0 \approx 5 \cdot 10^7$ м⁻³ способна обеспечивать появление на нем сверхвысокого значения электрического потенциала, численно составляющего по модулю около $\varphi_R \approx 506$ МВ.

4. Рассмотренные электрофизические процессы и новые дополнительные физические механизмы возникновения и накопления электрических зарядов в атмосферных кучево-дождевых и грозовых облаках могут быть полезными при построении специалистами в дальнейшем теории грозы в природных мелкодисперсных средах с заряжающимися за счет контактной электризации мелкими твердыми диэлектрическими частицами, характерными для мощных песчаных бурь в пустынях и вулканических дымовых извержений, когда в них объемная плотность N_0 электризуемых мелких твердых диэлектрических частиц составляет не менее 10^7 м⁻³.

5. Предложенные новые дополнительные электрофизические механизмы формирования электрических зарядов в облаках тропосферы Земли совместно с известными подобными механизмами, основанными на комплексной электризации в теплых восходящих воздушных потоках мелких водяных капель сферической конфигурации, будут способствовать дальнейшему развитию природы атмосферного электричества и успешному решению землянами глобальной проблемы молниезащиты на нашей планете различных технических объектов и обслуживающего их персонала.

Список литературы

1. Бортник И.М. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для ВУЗов / И.М. Бортник, А.А. Белогловский, И.П. Верецагин, Ю.Н. Вершинин, А.В. Калинин, Г.С. Кучинский, В.П. Ларионов, А.Е. Монастырский, А.В. Орлов, А.Г. Темников, Ю.С. Пинталь, Ю.Г. Сергеев, М.В. Соколова. Под общей ред. проф. И.П. Верецагина. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.
2. Базелян Э.М. Физика молнии и молниезащита / Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер. – М.: Физматлит, 2001. – 319 с.
3. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards / M.A. Uman // Proceedings of the IEEE. – 1988. – Vol. 76, No.12. – P.1548-1565.
4. Кужескин И.П. Молния и молниезащита / И.П. Ку-

жекин, В.П. Ларионов, Е.Н. Прохоров. – М.: Знак, 2003. – 330 с.

5. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства / В.И. Кравченко. – Х.: НТМТ, 2010. – 292 с.

6. <http://www.astronet.ru/db/msg/1244664>.

7. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев. Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.

8. Баранов М.И. Расчетная оценка толщины слоя индукционных электрических зарядов в металлическом проводнике / М.И. Баранов // Электротехника і електромеханіка. – 2011. – № 4. – С. 56-58.

9. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning. Part 1: General principles. Geneva, IEC Publ., 2010, pp.1-72.

10. Baranov M.I. A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350 μ s with an amplitude of \pm (100-200) kA / M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, S.V. Rudakov // Instruments and Experimental Techniques. – 2015. – Vol. 58, No. 6. – P. 745-750. – doi 10.1134/S0020441215060032.

11. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М.: Наука, 1990. – 624 с.

12. Бржезицкий В.О. Техніка і електрофізика високих напруг: Навчальний посібник / В.О. Бржезицкий, І.В. Білий, М.І. Бойко, В.І. Гуль, А.Г. Гурін, О.С. Льєнко, А.В. Ісакова, Б.М. Кондра, В.О. Копшин, В.І. Кравченко, Б.Г. Набока, О.Р. Проценко, В.В. Рудаков, Л.Т. Хименко, В.І. Хомініч, В.О. Шостак, В.І. Янішевський. За ред. В.О. Бржезицького, В.М. Михайлова. – Х.: НТУ «ХПІ» – Торнадо, 2005. – 930 с.

Bibliography (transliterated)

1. Bortnik I.M., Beloglovskiy A.A., Vereshchagin I.P., Vershinin Yu.N., Kalinin A.V., Kuchinskiy G.S., Larionov V.P., Monastyrskiy A.E., Orlov A.V., Temnikov A.G., Pinal' Yu.S., Sergeev Yu.G., Sokolova M.V. Elektrophizicheskie osnovy tekhniki vysokih naprjazhenij: Uchebnik dlya VUZov. Pod obshej red. prof. I.P. Vereshchagina [Electrophysics bases of technique of high voltage: Textbook for Institutes of higher / Under general ed. prof. I.P. Vereshchagin]. Moscow, Publishing house of MEI, 2010, 704 p.

2. Bazelyan E.M., Rayzer Yu.P. Fizika molnii i molniezashchita [Physics of lightning and protecting from

lightning]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 319 p.

3. Uman M.A. Natural and artificially-initiated lightning and lightning test standards. Trudy IEEE-Proceedings of the IEEE, 1988, Vol. 76, no.12, pp.1548-1565.

4. Kuzhekin I.P., Larionov V.P., Prokhorov E.N. Molniya i molniezashchita [Lightning and protecting from lightning]. Moscow, Znak Publ., 2003, 330 p.

5. Kravchenko V.I. Molniya. Elektromagnitnye faktory i ih porazhayushchee vozdeystvie na tehicheskie sredstva [Lightning. Electromagnetic factors and their striking affecting hardwares]. Kharkiv, NTMT Publ., 2010, 292 p.

6. <http://www.astronet.ru/db/msg/1244664>.

7. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij [The laws and formulas of physics / Editor. Ed. V.K. Tartakovskij]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1989, 864 p.

8. Baranov M.I. Raschetnaya otsenka tolshchiny sloya indyktsionnyh elektricheskikh zaryadov v metallicheskom provodnike [The calculation estimation of thickness of layer of induction electric charges in a metallic explorer]. Elektrotehnika i elektromehaniка-Electrical engineering & electromechanics, 2011, no.4, pp.56-58.

9. IEC 62305-1: 2010. Protection against lightning. Part 1: General principles. Geneva, IEC Publ., 2010, pp.1-72.

10. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Rudakov S.V. A generator aperiodic current pulses of artificial lightning with a rationed temporal form of 10/350 μ s with an amplitude of \pm (100-200) kA. Pribory i Tehnika Eksperimenta-Instruments and Experimental Techniques, 2015, Vol. 58, no.6, pp.745-750. doi 10.1134/S0020441215060032.

11. Jaworskiy B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990, 624 p.

12. Brzhezickiy V.A., Biliy I.V., Boyko N.I., Gul' V.I., Gurin A.G., Il'enko O.S., Isakova A.V., Kondra B.M., Kopshin V.O., Kravchenko V.I., Naboka B.G., Procenko O.R., Rudakov V.V., Khimenko L.T., Khominich V.I., Shostak V.A., Yanishevskiy V.I. Tehnika i elektrophizika vysokih naprjazhenij: Uchebnoe posobie / Pod red. V.A. Brzhezitskogo, V.M. Mihajlova [Technique and electrophysics of high voltage: Train aid / Ed. V.A. Brzhezickiy, V.M. Mikhaylov]. Kharkiv, NTU «KhPI» – Tornado Publ., 2005, 930 p.

Надійшла (received) 25.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баранов Михайло Іванович (Баранов Михаил Иванович, Baranov Michail Ivanovich) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-41; e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua.

Ваврів Людмила Владиславівна (Ваврив Людмила Владиславовна, Vavriv Ljudmila Vladislavovna) – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-63-09; e-mail: l.v.vavriv@gmail.com.