

МЕХАНИЗМ ЗАРЯЖЕНИЯ ОБЛАЧНЫХ ЧАСТИЦ, ОБУСЛОВЛЕННЫЙ РАЗЛИЧИЕМ ХИМИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ

Г.Г. БАХШЯН

Институт радиофизики и электроники НАН Армении

(Поступила в редакцию 11 июля 1994 г.)

Предложен механизм заряжения облачных частиц, при котором нет необходимости в наличии внешнего сильного электрического поля. Для зарядки облачных частиц достаточно, чтобы облака находились в термодинамически неустойчивом, многофазно-многодисперсном состоянии. Представлена математическая модель электроемкости систем облачных частиц и описан процесс их зарядки. Проведены численные оценки.

Введение

Непосредственные измерения параметров грозовых облаков показывают, что существенная часть капель (радиусом менее 500 мкм) несет заряд, близкий к предельно максимальным релейевским значениям: $Q_{\text{пред}} \sim 16\pi\sigma r^3$, где σ —поверхностное натяжение воды, r —радиус капли [1]. Есть предположение, что капли приобретают такой заряд при прямом взаимодействии со стримером во внешнем интенсивном электрическом поле грозового облака [2,3].

В теоретическом плане на современном этапе существуют два типа механизма электризации частиц в облаке: ионное заряжение - заряжение частицы за счет избирательного захвата им ионов среды, и контактное заряжение, возникающее при разрыве временного контакта частиц, характеризуемое различными физико-химическими свойствами [4-9]. Теория ионно-диффузионного заряжения при наличии внешнего электрического поля развивалась, в основном, в работах [4,5,6]. Теория контактного заряжения, возникающая при отскоках облачных капель при наличии внешнего электрического поля рассмотрена в работах [7,8,9].

Наблюдением установлено, что в облачных средах, состоящих из однофазных и слабодисперсных частиц, значение электроактивности

достаточно низко. Наряду с этим, учитывая, что в природе, как правило, повышенное значение электроактивности возникает только в таких облачных средах, чьи частицы обладают свойствами многофазности (пар-капля-переохлажденная капля-кристаллики-градины различной формы и модификации), многодисперсности (частицы и капли широкого спектра размеров и различной геометрической формы), и облака в целом находятся в термодинамически неустойчивом состоянии (с наличием кучеобразности и многослойности, турбулентных потоков в них, градиентов давления и температуры, глубокопереохлажденных метастабильных капель, чьи термодинамические параметры в свою очередь обладают свойством сингулярности и разрыва, фазового перехода второго рода и т.п.), мы пришли к следующему выводу:

Наряду с вышеизложенными возможностями электризации облачных сред есть и другая, связанная с внутренними физико-составными свойствами облачной среды как аномально многофазной, многодисперсионной, многокомпонентной гетерогенной системы. Особые экстраординарные свойства таких систем как активных источников электрических и других физических полей впервые описаны в теоретических исследованиях проф. С. Баласаняна [10]. Используя представления [10], развитые им для геологической среды, вполне разумно ожидать, что и в облачных средах возникновение интенсивного электрического поля является, скорее всего, не причиной заряжения частиц, а наоборот, ее следствием. То есть разноименно заряженные облачные частицы образуют многоступенчатую взаимную электроемкость (электроемкость, образованную между соседними каплями, между облачными слоями, между облачными кучами, между соседними облаками и, наконец, между облаками и безоблачным влажным пространством), электрическое поле которой и ответственно за наблюдаемую напряженность, приводящую к развитию грозových процессов в облаках.

После этого остается открытым следующий основной вопрос. Если определяющим фактором элементарной электризации облачных частиц не является внешнее электрическое поле, то какие внутренние и (или)

внешние физические, физико-химические факторы заставляют облачные частицы избирательно (по знаку) заряжаться до предельно максимального релеевского значения.

Оказывается, что аномально высокая разность химических потенциалов, возникшая между облачными частицами и паром, и образование многоступенчатой взаимной емкости в облачных средах в определенном термодинамически неустойчивом или метастабильном состоянии облачных частиц могут достигать такого уровня, что процессы предельной максимальной зарядки станут вынужденным следствием.

Идея предложенного механизма заключается в следующем:

Облачная среда при эволюции непрерывно модифицирует свою внутреннюю физическую структуру и конструкцию. В тех случаях, когда распределение частиц в облаках характеризуется многодисперсностью и многофазностью, то значения свободной энергии Гиббса или химических потенциалов частиц должны эффективно отличаться друг от друга. Следовательно, возникнет контактная разность электрического потенциала между частицами и паром. Если пар находится в перенасыщенном состоянии, то знак разности химического потенциала между фазами пар-частица положителен и меняется на противоположный при таком режиме, когда пар переходит в состояние недонасыщения [11]. Из этого следует, что облачные частицы в режиме испарения охотно (в первую очередь) эмиттируют положительные ионы, а при конденсации в первую очередь от паров присоединяют отрицательные ионы.

Заметного усиления этого фактора можно ожидать от глубоко переохлажденных капель, когда последние находятся в высоком метастабильном состоянии, где все термодинамические величины среды приобретают свойства сингулярности (т.е. высшие производные параметров отличны от нуля) или претерпевают фазовый переход второго рода [12,13]. При переохлаждении водной капли разрываются водородные связи [12,14]. Разрыв водородной связи (межмолекулярной, частично и внутримолекулярной) сопровождается образованием ионов H^+ и $(OH)^-$. Они избирательно участвуют в процессе испарения в

зависимости от знака разности химического потенциала пар-переохлажденная капля. Разные участки облаков, расположенных на разных высотах, находятся в различных термодинамических условиях, и следовательно, процессы зарядки частицы в этих зонах должны протекать тоже избирательно (по знаку). Таким образом, многократное повторение процессов конденсация-испарение-конденсация глубокопереохлажденных капель сопровождается спонтанной зарядкой этих частиц. С другой стороны, образовавшаяся взаимная емкость принуждает к избирательному захвату или эмиссии ионов при вышеуказанном фазовом превращении. При этом термодинамическая энергия облачной среды частично и самопроизвольно превращается в электрическую. Одно из основных различий предложенной модели от существующих [1-9] заключается в следующем: несмотря на то, что при моделировании процесса элементарной электризации облачных частиц понятие взаимной емкости в работах [1-9] играло ключевую роль, их авторы пренебрегали вкладом существующей, так называемой многоканальной взаимной емкости. Дело в том, что каждая пробная частица одновременно образует взаимную емкость со всеми соседями, химические потенциалы которых отличны от химических потенциалов пробных частиц. Фактор многоканальности особенно эффективен в тех облаках, которые обладают следующими свойствами: многодисперсностью, многофазностью и наличием различных термодинамических состояний в разных частицах облаков.

Ради ясности добавим, что при вышеприведенном анализе мы учли тот факт, что термодинамически неустойчивое состояние возникает как в облачной среде в целом, так и, в частности, внутри глубокопереохлажденных капель, чьи термодинамические параметры приобретают свойства сингулярности и фазового перехода второго рода [12,13]. Определенный интерес представляет тот факт, что переохлажденные водяные капли по мере переохлаждения скачком увеличивают свою теплоемкость, разрываются водородные связи, величина которых чувствительно зависит от размеров капли, от

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \sum_{i=1}^n (C_{ii} \Phi_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n C_{ij} (\Phi_j - \Phi_i)) . \quad (2)$$

Выражение (2) можно представить и в следующем виде:

$$Q = \sum_{i=1}^n C_{ii} \gamma_i \Phi_i , \quad (3)$$

где

$$q_i = C_{ii} \gamma_i \Phi_i \quad (4)$$

есть заряд i -ой частицы,

$$C_i = C_{ii} = 4\pi\epsilon_0\epsilon_{ij}r_i \quad (5)$$

есть собственная емкость i -ой частицы, имеющей радиус r_i , ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, ϵ_{ij} — диэлектрическая проницаемость межкапельного пространства, $\Phi_i - \Phi_j$ — контактная разность потенциалов i -ой и j -ой капель, контактирующих через облачный пар.

В дальнейшем для упрощения задачи примем, что все частицы облаков имеют только сферическую симметрию, тогда величина взаимной емкости, образовавшейся между частицами i и j , будет

$$C_{ij} = C_i / \left(1 + \frac{r_j - 2r_i}{r_j r_{ij}} \right), \quad (6)$$

где r_i — радиус i -ой частицы, r_{ij} — расстояние между центрами частиц i и j .

Из (6) следует, что отношение C_{ij}/C_i при осуществлении кратковременного контакта, когда значение $r_{ij} \rightarrow r_i \sim r_j$, может варьировать в широких пределах. При перемигках величину r_{ij} можно моделировать следующим эмпирическим выражением:

$$r_{ij} \cong r_i + r_j + R_{ij} [1 - \exp(-\lambda_{\text{част}} / \lambda_{\text{пар}})] , \quad (7)$$

где R_{ij} — истинное расстояние между частицами, $\lambda_{\text{част}}$ и $\lambda_{\text{пар}}$ — соответственно электропроводность частицы и паровой среды. В определенных ситуациях, когда значение $\lambda_{\text{пар}} \rightarrow \lambda_{\text{част}}$, вклад перемигки станет эквивалентен кратковременному контакту. Физика этого процесса исследована и проанализирована в работах [4-9].

Коэффициент γ_i принимает следующий вид:

$$\gamma_i = 1 + \sum_{j=1}^n C_{ij} (\Phi_j - \Phi_i) / C_{ii} \Phi_i \quad (8)$$

и характеризует процессы многоканального образования взаимной электроемкости, образовавшейся между пробной i -ой частицей и частицами облаков, имевших различный контактный потенциал с паром и отличных от потенциала i -ой пробной частицы.

Из (8) следует, что γ_i принимает наибольшее значение при условии, что разность $\Phi_j - \Phi_i$ большая, что возможно в многодисперсной и многофазной среде, в которой частицы находятся в различном термодинамическом состоянии.

Результаты (3) или (4) были получены при условии, когда $\lambda_{\text{пар}}$ принимало столь угодно большое значение. Однако в реальности $\lambda_{\text{пар}}$ принимает конечное значение. Из этого факта следует, что процессы зарядки происходят не мгновенно, а через определенный интервал времени, т.е.

$$q_i = C_{ij} \gamma_i \Phi_i [1 - \exp(-t/\tau_{\text{пар}})], \quad (9)$$

где t — время зарядки, $\tau_{\text{пар}} = (4\pi\lambda_{\text{пар}})^{-1}$.

Тогда плотность зарядов в i -ой частице можно представить в следующем виде:

$$\rho_i = \frac{q_i}{V_i} = \frac{3C_{ij} \gamma_i \Phi_i}{4\pi r_i^3} [1 - \exp(-t/\tau_{\text{пар}})]. \quad (10)$$

Напряженность электрического поля, следовательно, будет

$$|E| \cong \rho_i r_i / \epsilon_0 \epsilon_{ij}. \quad (11)$$

Учитывая, что каждой взаимной электроемкости обычно соответствуют некоторые макромасштабные дипольные моменты, которые выражаются формулой

$$|p_{ij}| = 2q_{ij} r_i^3 / r_{ij}^2, \quad (12)$$

величина p_{ij} будет иметь следующий вид:

$$|p_{ij}| = 2C_{ij} (\gamma_i - 1) \Phi_i [1 - \exp(-t/\tau_{\text{пар}})] r_i^3 / r_{ij}^2 \quad (13)$$

или

$$|p_i| = 2 \sum_{j=1}^n C_{ij} (\Phi_j - \Phi_i) [1 - \exp(-t/\tau_{\text{пар}})] r_i^3 / r_{ij}^2. \quad (14)$$

Теперь представим аналитический вид контактной разности электрических потенциалов (они возникают в комплексе частица-пар-

пар-частица, зависящем от фазовых состояний, от функции распределения частицы по размерам, от метастабильного состояния этих капель, от внутренних давлений капель, давления пара и т.д.), в той мере, в которой это потребуется для описания процессов электризации облачных частиц.

Контактная разность потенциалов пар-частица и частица-частица

Рассмотрим для этого величину свободной энергии Гиббса [11,16], $G = u - ST + PV$, где u — внутренняя энергия, S — энтропия, V — объем системы, P — давление пара, T — температура среды.

Разность свободной энергии между облачным паром и частицей обозначим через ΔG , тогда

$$\Delta G = \Delta u - T\Delta S - S\Delta T + P\Delta V + V\Delta P. \quad (15)$$

Следуя [11,16], выражение (15) можно преобразовать к следующему виду:

$$\Delta G = \Delta U - T\Delta S - S\Delta T - \frac{4}{3}\pi r^3 n_L kT \ln \frac{P}{P_s} + 4\pi r^2 \sigma_0, \quad (16)$$

где r — радиус частицы, kT — тепловая энергия, n_L — число молекул в единичном объеме частицы, P_s — давление пара, насыщенного по отношению к воде (когда пар и вода находятся в равновесии), иначе говоря, давление внутри капли, σ_0 — удельная поверхностная энергия частицы. Тогда с учетом того, что энтропия систем

$$\Delta S = \int_0^T C(t)/T \cdot dt, \quad (17)$$

где $C(t)$ — теплоемкость системы, разность химических потенциалов, образовавшихся между облачными частицами i и j , может быть представлена в виде:

$$\Delta \mu_{ij} = \Delta G_{ij} / n_L \cong e(\varphi_j - \varphi_i) + A. \quad (18)$$

Отсюда контактная разность потенциалов между частицами будет:

$$\begin{aligned} \varphi_j - \varphi_i \cong & -\frac{4}{3e} \pi kT \left(r_j^3 \ln \frac{P}{P_{sj}} - r_i^3 \ln \frac{P}{P_{si}} \right) + \frac{4\pi r_0}{n_L e} (r_j^2 - r_i^2) + \\ & + \frac{1}{n_L e} \left[(\Delta U_j - \Delta U_i) - \left(T \int_0^T C_j(T)/T \cdot dt - T \int_0^T C_i(T)/T \cdot dt \right) \right] - \frac{A}{e}, \end{aligned} \quad (19)$$

где e —элементарный заряд, $\Delta\psi_{ij}$ —разность энергии химического потенциала между частицами i и j , A —энергия работы выхода зарядов из капель.

Ввиду того, что носителем заряда в облаке в основном являются ионы молекулы H_2O , которые при конденсации или испарении почти свободно проходят через поверхностный барьер капель, то истинное значение работы выхода зарядов за поверхность капель близко к нулю. Таким образом, разность электрохимических потенциалов между соседними частицами в этих случаях, в основном, определяется только разностью свободных энергий Гиббса. Здесь нет необходимости выполнять работу для выхода электрических зарядов за поверхность облачных частиц, и выход осуществляется вместе с испаряющейся (конденсирующейся) молекулой воды.

Как следует из первого слагаемого правой части выражения (19), отношение P/P_s может принимать значения больше или меньше единицы в зависимости от того, в каком состоянии находится пробная частица i в перенасыщенном ($P > P_s$) состоянии или недонасыщенном ($P < P_s$) (пробные облачные капли испаряются или набирают молекулы H_2O). И, следовательно, знак величины химического потенциала, обусловленного этим слагаемым, может быть как положительным, так и отрицательным. Знак разности потенциала этого слагаемого зависит также и от радиуса капли, причем в довольно чувствительной мере (по кубическому закону).

Второе слагаемое правой части выражения (19) обусловлено вкладом поверхностного натяжения, и ее знак также зависит от радиуса капли. Третье и четвертое слагаемые дают особо важный вклад при образовании глубоко переохлажденных капель. Поскольку в переохлажденном состоянии капель при понижении температуры разрываются водородные связи [12], то внутренняя энергия G существенно отличается от таковой в твердом состоянии. Ввиду того, что переохлажденные капли воды при температуре $T \rightarrow T_c = -42^\circ C$ испытывают фазовый переход второго рода, то величина $C(T)$ -теплоемкость этих частиц, приобретает свойства разрыва [13]. Почти все

термодинамические величины приобретают свойства сингулярности. И, следовательно, ожидаемая разность химических потенциалов между соседними облачными частицами может принимать теоретически любое значение в интервале $-\infty < \varphi_i < +\infty$.

В итоге, степень ожидаемого значения зарядки частиц может достигать предельно максимального значения, вплоть до образования самопроизвольного стримера и развития разрядных процессов.

Механизм образования многоступенчатой взаимной емкости в облачных средах

Так как пространственное распределение облачной системы таково, что в большинстве случаев отдельные ее части находятся на различных высотах, в различных термодинамических условиях, то капли или частицы, имеющие одну и ту же свободную энергию Гиббса, подчиняясь требованию минимизации внутренней энергии систем, должны скапливаться на различных высотах, в различных кучах и т.д. При этом создаются благоприятные условия для образования слоистых или кучевых облаков, обладающих в целом различными потенциалами. Эти слоистые или кучевые макромасштабные подсистемы в облаке, которые обладают различными химическими потенциалами, в свою очередь, создают взаимную емкость и распределяют заряды (по знаку) между слоями или кучами.

Представим математическую модель электризации указанных сред.

Математическое моделирование процесса зарядки облачных слоев или куч почти не отличается от процессов зарядки облачных частиц. Следовательно, количество зарядов Q^{cn} , накопленных в облачном слое, представляется в следующем виде:

$$Q^{cn} = C_{ii}^{cn} \varphi_i^{cn} \gamma_i^{cn} [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (20)$$

где C_{ii}^{cn} — собственная емкость i -ого слоя, φ_i^{cn} — ее потенциал, γ_i^{cn} — коэффициент, учитывающий вклад взаимной емкости, образовавшейся между слоями:

$$\gamma_i^{cn} = 1 + \sum_{j=1}^n C_{ij}^{cn} (\varphi_j^{cn} - \varphi_i^{cn}) / C_{ii}^{cn} \varphi_i^{cn}, \quad (21)$$

где

$$C_{ij}^{cn} \cong 4\pi\epsilon_0 \epsilon_{ij}^{cn} S_i^{cn} / d_{ij}^{cn} \quad (22)$$

—взаимная емкость слоев, S_i^{cn} —наименьшая поверхность этих слоев, d_{ij}^{cn} —расстояние между слоями. Аналогичное моделирование можно сделать и для кучевых облаков. Тогда напряженность квазиэлектростатического поля в полости облачных слоев будет

$$|E| \cong Q_i^{cn} / \epsilon_0 \epsilon_{ij}^{cn} S_i^{cn} = n^{cn} (\varphi_2^{cn} - \varphi_1^{cn}) / d_{21}^{cn}, \quad (23)$$

где n^{cn} —число частиц в слое, в столбе поверхности, отсюда макромасштабный дипольный момент может быть представлен в виде

$$|p_{ij}| = 2Q_{ij}^{cn} d_{ij}^{cn} = 2C_{ij}^{cn} \varphi_i^{cn} (\gamma_i^{cn} - 1) [1 - \exp(-t/\tau)] d_{ij}^{cn}, \quad (24)$$

или

$$|p_{ij}| \cong 2C_{ij}^{cn} (\varphi_j^{cn} - \varphi_i^{cn}) d_{ij}^{cn} [1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (25)$$

Ожидаемая плотность зарядов в частицах, размеры которых имеют порядок $r_i \sim r_j \sim r_{ij} \sim 10 \text{ мкм}$, $R_{ij} \sim 10^{-3} \text{ м}$ и $\epsilon_{ij} \sim 1$, $\lambda_{\text{пар}} \sim \lambda_{\text{част}}$, рассчитанная по формуле (10), будет $\rho \sim 2,5 \cdot 10^3 \text{ Кл/м}^3$. Напряженность электрического поля вблизи поверхности частицы, рассчитанная по формуле (11), будет $|E| \sim 10^8 \text{ В/м}$. Средняя величина дипольного момента, образовавшегося между заряженными частицами, рассчитанная по формуле (12), будет $|p_{ij}| \sim 10^{-21} \text{ Кл}\cdot\text{м}$. В случае, когда $n^{cn} \sim 10^4$ частиц и $d_{21} \sim 10^2 \text{ м}$, $\varphi^{cn} \sim 10 \text{ В}$, то напряженность электрического поля между облачными слоями, определяемая формулой (23), будет $|E^{cn}| \sim 10^{2+10^3} \text{ В/м}$. Тогда дипольный момент облачного межслойного конденсатора будет $|p^{cn}| \sim 10^5 \text{ Кл}\cdot\text{м}$.

Заключение

Если облачная среда обладает свойствами многофазности, многодисперсности и находится в термодинамически неустойчивом состоянии, при котором термодинамические параметры приобретают свойство сингулярности, то возникает реальная возможность для интенсивной самопроизвольной зарядки облачных частиц.

Ионы различных знаков, образующиеся при разрыве водородной связи или путем фотоионизации в глубокопереохлажденных каплях, участвуя в процессах многократного испарения и конденсации, при наличии высокой разности контактного потенциала избирательно (по знаку) перераспределяются по каплям, вследствие чего происходит избирательное зарядение облачных частиц.

В заключение выражаю глубокую благодарность проф. С.Ю. Баласаняну, совместная работа с которым в Национальной службе сейсмической защиты РА способствовала формированию моих новых взглядов на процессы электризации облачных частиц в атмосфере.

ЛИТЕРАТУРА

1. W.Gaskel, A.J.Pingworh, J.Latham. G.B.Journ. Roy, Met. Soc., 109, 447 (1978).
2. В.М.Ким, И.Г.Момонова. Труды ИЭМ, 44(134), 31 (1987).
3. E.Barker, J.A.Bicknell, R.F.Griffits, J.Latham, T.S.Verma. Quart, Journ. Roy. Met. Soc., 109, 631 (1983).
4. В.М.Мучник. Физика грозы. Л., Гидрометеиздат, 1971.
5. В.Н.Морозов. Труды ГГО, 427, 27 (1982).
6. Лабораторное моделирование процессов контактной электризации облачных частиц. Гидрометеиздат, 1985.
7. Ch.Magono. Thunderstorms. New York, Pergamon Press, 1980.
8. J.P.Kuettner, Z.Levin, J.D.Sartor. Journ. Atmosph. Sci., 38, 2470 (1981).
9. S.G.Jennings. Quart. Journ. Roy Met. Soc., 101, 227 (1975).
10. С.Ю.Баласанян. Динамическая геоэлектрика. Новосибирск, "Наука", 1990.
11. А.Х.Хргиан. Физика атмосферы. Л. Гидрометеиздат, 1978.
12. А.Г.Годизов, А.С. Степанов. Труды ИЭМ, 34(109), 51 (1985).
13. Вода и водные растворы при температуре ниже 0°C. Киев, "Наукова думка", 1985.
14. И.Г.Каплан. Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М., "Наука", 1982.
15. А.Н.Тихонов, А.А.Самарский. Уравнения математической физики. М., "Наука", 1966.
16. N.H.Fletcher. The physics of rainclouds. Cambridge, 1962.

MECHANIZM OF CLOUD PARTICLES CHARGING DETERMINATED BY THE DIFFERENCE IN THEIR CHEMICAL POTENTIALS

H.G. BAKHSHIAN

The mechanizm of cloud particles charging such that there is no need for strong external electric field availability is proposed. To charge the cloud particles it is sufficient for the cloud to be in thermodynamically instable, multiphase and multi-dispersive condition. The mathematical electric capacity model of the cloud particles system is presented and processes of their charging are described. Numerical calculations are carried out.