

УДК 551.510

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ОБЛАКАХ

Г. Г. БАХШЯН

Институт радиопизики и электроники АН АрмССР

(Поступила в редакцию 20 марта 1982 г.)

Исследован возможный механизм взаимодействия геомеханической силы (силы тяжести и силы движущихся облаков) с молекулами H_2O , находящимися в облаке, приводящего последние в электрически поляризованное состояние. Предложенная модель основана на том факте, что распределение массы в молекуле воды асимметрично. Выведены необходимые условия, при выполнении которых в облаке возникает электричество.

1. Электризация облаков (кучевых и кучево-дождевых в предгрозовом и грозовом состояниях) науке известна с первого дня исследования электричества. В настоящее время существуют десятки гипотез и механизмов генерации электричества в кучевых и кучево-дождевых облаках [1—4]. Однако достаточно полной и убедительной теории, объясняющей это чрезвычайно интересное явление, пока еще нет, хотя экспериментально хорошо исследованы многие процессы (погодные условия, температура, давление и движение облаков, условие ионизации H_2O и т. д.), при выполнении которых в атмосфере генерируется электричество [1—4].

Ниже предлагается новая физическая картина возможного механизма преобразования геохимической энергии в электростатическую на некоторых стадиях эволюции облаков. Силы тяжести и силы движущихся облаков в определенных условиях могут механически переориентировать дипольные моменты молекул H_2O , вследствие чего возникает поляризация. Показано, что при генерации электрического поля в облаках присутствие ионов в атмосфере не обязательно, как этого требуют существующие некоторые теории (гипотезы).

2. Если исследуемая молекула (диполь) H_2O находится в соседстве с другими диполями и на пробный диполь действует внешнее электрическое поле E , то вектор поляризации среды определяется следующим образом [5]:

$$p = 4\pi N p_0 \langle \cos \theta \rangle n, \quad (1)$$

где N — число молекул в единице объема ($см^3$), p_0 — дипольный момент молекулы H_2O , n — единичный вектор, ориентированный параллельно полю E , θ — угол между векторами E и p_0 ; усреднение в (1) проведено по всем возможным ансамблям:

$$\langle \cos \theta \rangle = \frac{\int \cos \theta \exp \left(- \frac{E p_0 + \langle E_0 \rangle p_0 \cos \theta}{kT} \right) d\Omega}{\int \exp \left(- \frac{E p_0 + \langle E_0 \rangle p_0 \cos \theta}{kT} \right) d\Omega} = L(b). \quad (2)$$

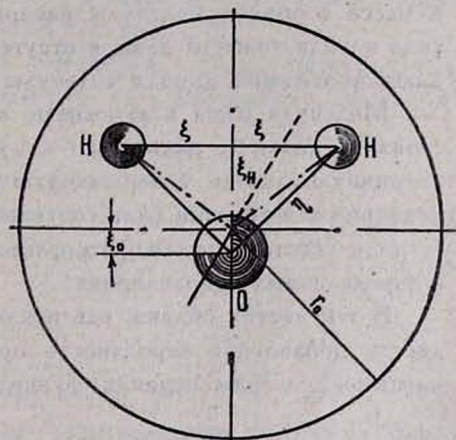
Здесь k — постоянная Больцмана, T — гидродинамическая температура, $\langle E_0 \rangle$ — среднее значение поля соседних диполей (при отсутствии поля E усредненное значение $\langle E_0 \rangle$ равно нулю), $L(b)$ — функция Ланжевена, $b = (E p_0 + \langle E_0 \rangle p_0) / kT$.

На пробную молекулу воды, находящуюся в облачной среде, действуют силы, обусловленные а) геофизической разностью потенциалов в атмосфере; б) усредненным полем соседних диполей $\langle E_0 \rangle$; в) ускорением пробной молекулы при механическом движении облаков; г) силой тяжести Земли и т. д.

Хотя последние две силы непосредственно не действуют на заряды пробного диполя, тем не менее они частично ориентируют диполи молекулы воды вследствие того, что центр тяжести и геометрический центр молекулы, находящейся в парообразной и в переохлажденной каплях, не совпадают (см. рисунок).

Значения параметров:

$$\begin{aligned} \xi_H &= 0,043 \text{ нм}, \quad \xi_O = 0,013 \text{ нм}, \quad OH = \eta = \\ &= 0,096 \text{ нм}, \quad z_b = \xi_H + \xi_O = \eta \cos(\widehat{HON}) = \\ &= 0,056 \text{ нм}, \quad \widehat{HON} = 105^\circ 03', \\ m_H &= 1,6734 \cdot 10^{-24} \text{ г}, \quad m_O = 16 m_H, \\ r_0 &= 0,138 \text{ нм}. \end{aligned}$$



Дело в том, что структура H_2O такова, что энергия сцепления между молекулами обусловлена в основном следующими типами взаимодействий: электростатическим (диполь-дипольное взаимодействие и т. д.), квантовомеханическим и взаимодействием, осуществляемым через водородные связи.

Когда вода находится в парообразном состоянии, энергия сцепления между молекулами обусловлена электростатическим взаимодействием [6], при котором естественно предположить, что геометрический центр молекулы совпадает с центром диполя. В жидкой фазе взаимодействие носит квантовомеханический характер, и геометрический центр совпадает с центром инерции [6, 7]. В этих двух фазовых состояниях существует вероятность свободного вращения молекулы H_2O . В фазе льда энергия сцепления обусловлена в основном водородными связями, причем геометрический центр совпадает с центром тяжести массы кислорода. В этом случае свободное вращение молекулы H_2O маловероятно [6]. Наконец, в переохлаж-

денном состоянии H_2O взаимодействие между молекулами происходит так же, как в фазе льда, и геометрический центр совпадает с центром массы кислорода, причем в отличие от льда молекула здесь имеет вероятность свободного вращения. Последнее основывается на теоретических оценках [8], в соответствии с которыми при отсутствии водородных связей точка фазового перехода лед—вода $T_{пл} \approx 200$ К. Кроме этого, если размер r переохлажденной капли (зародыша) будет меньше длины свободного пробега r_a или когда энергия активации молекулы в капле будет больше энергии поверхностного натяжения, то пробная молекула с некоторой вероятностью будет вести себя подобно индивидуальной частице со свойствами маятника.

Из вышеизложенного следует, что если геометрический центр не совпадает с центром инерции и молекула H_2O имеет вероятность свободного вращения, то она приобретает новое качество — свойство физического маятника.

Молекулу воды в переохлажденной капле облака (с радиусом $r < r_a$) упрощенно можно представить в виде асимметричной гантели или физического маятника, который под действием силы тяжести и геомеханической силы движущихся облаков получает угловую ориентацию. Так как заряд и масса в объеме молекулы распределены одинаково, то геомеханическая сила и сила тяжести даже в отсутствие внешних электрических полей создают ориентацию диполя молекулы H_2O .

Молекула воды в атмосфере в парообразном и переохлажденном состояниях капли (с радиусом $r < r_a$) представляет собой взвешенную асимметричную гантель, совершающую хаотические тепловые колебания, а геомеханическая энергия (или соответствующий ей вращающий момент) играет роль восстанавливающего фактора, заставляющего ее ориентироваться в определенных направлениях.

В тех частях облака, где исключен режим свободного падения, появляется добавочная вероятность ориентации пробной молекулы (диполь-маятника), выражающаяся функцией распределения Больцмана

$$d\rho(\theta) = \text{const} \exp\left(-\frac{Mn_0}{kT}\right) d\Omega, \quad (3)$$

где M — вращающий момент маятника H_2O , n_0 — единичный вектор, ориентированный параллельно приложенной внешней силе.

Согласно Френкелю [9], при наличии внешних сил с моментом M ось каждой молекулы должна поворачиваться в плоскости, проходящей через направление силы с угловой скоростью $\omega = \alpha M$, где коэффициент α может быть назван «вращательной подвижностью» частицы ($1/\alpha = 8\pi r_0^3 \mu$). Векторная запись выражения для угловой скорости имеет вид

$$M = 8\pi r_0^3 \mu \omega, \quad (4)$$

где r_0 — радиус молекулы, μ — молекулярная вязкость среды, ω — угловая скорость вращения молекулы H_2O .

Когда пробная молекула H_2O находится в льдинке (режим межмолекулярного жесткого сцепления), формула (4) неприменима и понятие угловой скорости теряет смысл.

Угловую скорость маятника будем определять по формуле

$$\omega = \int_0^{\tau} \varepsilon dt = \varepsilon \tau, \quad (5)$$

где

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^2 M_i^0}{\sum_{i=1}^2 J_i^0} = \frac{m_O \xi_O a - 2 m_H \xi_H a}{m_O \xi_O^2 + 2 m_H \xi_H^2} = \frac{a}{l} \quad (6)$$

есть угловое ускорение маятника, a — суммарное ускорение сил тяжести и сил движущихся облаков, m_O — масса атома кислорода, m_H — масса атома водорода, ξ_O и ξ_H — плечи маятника (см. рисунок), τ — время ориентационной релаксации, l — приведенная длина маятника.

Временными вариациями ускорения силы движущихся облаков и приведенной длины маятника в этой работе мы пренебрегаем.

Подставляя (4) и (6) в (3), получаем

$$d\varphi(\theta) = \text{const} \exp \left(- \frac{8 \pi r_0^3 \mu a \tau}{k T l} \cos \theta \right) d\Omega. \quad (7)$$

В этой формуле выражение $8 \pi r_0^3 \mu / k T = \tau$ представляет собой время ориентационной релаксации диполя молекулы H_2O [9].

Так как электростатическая сила в атмосфере, сила тяжести и сила движущихся облаков действуют на молекулы воды независимо, то из формул (2) и (7) следует

$$\langle \cos \theta \rangle = \frac{\int \cos \theta \exp [-(b + G) \cos \theta] d\Omega}{\int \exp [-(b + G) \cos \theta] d\Omega} = L(b + G), \quad (8)$$

где

$$G = a \tau^2 / l.$$

Имея в виду (1), получим

$$p = 4 \pi N p_0 L(b + G) n. \quad (9)$$

Из (9) следует, что даже при отсутствии электростатического поля Земли существует поляризация за счет второго слагаемого в экспоненте (8).

3. Оценки показывают, что в облаках в реальных условиях [1, 10] $N = (3 \div 300) \cdot 10^{15}$ диполь/см³, $p_0 = 1,85$ Дебая. Принимая $l = 0,05$ нм и не входя в детали динамики движущихся облаков, можно предположить, что в режиме вертикальной тяги (где существенную роль играет ускорение, обусловленное градиентом поляризации) величина $a \approx (1 \div 3) \times 10^3$ см/с². Конечно, можно ожидать, что турбулентное перемешивание будет подавлять среднее значение величины ускорения a , однако экспериментальные наблюдения показывают, что в электризованных облаках большинство частиц находится в ориентированном состоянии [11, 12]. Так что турбулентное перемешивание в процессе электризации облачных элементов может играть только второстепенную роль.

Время τ ориентационной релаксации пробной молекулы H_2O , когда последняя находится в водной среде, при $T \approx 0^\circ \text{C}$ есть величина порядка $\tau \approx 10^{-11}$ с. Когда же пробная молекула H_2O находится в конденсированном состоянии при температуре льда $T \approx -1 \div -20^\circ \text{C}$, за счет увеличения

вязкости значение τ будет приблизительно 10^{-4} с [7]. В случае же, когда пробная молекула находится в переохлажденной капле при $T \approx -1 \div -50^\circ \text{C}$, можно предположить, что величина τ находится между указанными значениями.

Таким образом, если облака находятся в неподвижном состоянии или в режиме интенсивной тяги, где $a \approx (1 \div 3) \cdot 10^3 \text{ см/с}^2$, и капелька находится в переохлажденном состоянии, то, выбирая $\tau \approx (1 \div 3) \cdot 10^{-6}$ с, получим $b \approx (1 \div 10) \cdot 10^{-6}$, $G \approx (1 \div 10)$, $L(b + G) \approx 1$. Следовательно, значение вектора поляризации в единичном объеме облака будет порядка $|p| \approx (20 \div 2000) \text{ В/см}$.

Отметим, что даже в отсутствие E слагаемое $\langle E_0 \rangle p_0/kT$ в аргументе функции $L(b + G)$ не будет равняться нулю, так как механическое взаимодействие сил тяжести и тяги с диполь-маятниками приводит к ориентации соседних диполей, которая и создает внутреннее эффективное поле $\langle E_0 \rangle$.

Обычно скорость роста кристаллизации капельки происходит настолько медленно, что время фазового перехода τ_f (или время сублимации τ_s) всегда больше, чем время τ ориентационной релаксации, поэтому рост кристаллизации осуществляется таким образом, что упорядочение молекул H_2O успевает создать такую структуру, в которой энергия сцепления между молекулами принимает минимальное значение, вследствие чего суммарный вектор поляризации оказывается равным нулю. Однако в тех случаях, когда $\tau_f < \tau$, льдинка может сильно поляризоваться, что в определенных условиях может привести к диэлектрической катастрофе.

Внешнее электрическое поле Земли хотя и способствует ориентации диполей молекул H_2O , но его роль в процессе поляризации облаков не является первостепенной. Наличие свободных ионов в облаке приводит к повышению проводимости среды, которая будет уменьшать степень поляризуемости облаков.

4. Выше мы показали, что молекула H_2O в парообразном и переохлажденном состояниях капли (с радиусом $r < r_a$), обладая свойством асимметричной гантели (или физического маятника), может механически ориентироваться, что, в свою очередь, приводит к ориентации дипольного момента, т. е. действие механической силы на диполь становится эквивалентным действию силы внешнего электрического поля. Эта механическая сила в обычных условиях играет пренебрежимо малую роль. Как следует из оценок, этот эффект становится существенным именно тогда, когда $at^2 > l$ и существует вероятность свободного вращения молекул H_2O . Этим требованиям удовлетворяет взвешенная капля (с радиусом $r < r_a$), находящаяся в переохлажденном состоянии со временем ориентационной релаксации $\tau \approx 10^{-6}$ с.

Таким образом, можно утверждать, что энергия движущихся облаков на определенных стадиях их эволюции может преобразовываться в электростатическую энергию, вследствие чего возможно появление предгрозовых и грозовых состояний в атмосфере.

Автор выражает свою искреннюю благодарность Г. М. Гарибьяну, Ян Ши, А. Н. Кочаряну и Э. В. Сехпояну за ценные советы и обсуждения полученных результатов.

1. Качурин А. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы, Гидрометеиздат, Л., 1978.
2. Имянитов И. М., Чубарина Е. В., Шварц Я. М. Электричество облаков, Гидрометеиздат, Л., 1971.
3. Чалмерс Д. Атмосферное электричество, Гидрометеиздат, Л., 1974.
4. Базелян Э. М., Гарик Б. Н., Левитон В. И. Физические и инженерные основы молниезащиты, Гидрометеиздат, Л., 1978.
5. Киттель Ч. Элементарная физика твердого тела, Изд. Наука, М., 1965.
6. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды, Гидрометеиздат, Л., 1975.
7. Шулейкин В. В. Физика моря, Изд. Наука, М., 1968.
8. Каплан И. Г. Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий, Изд. Наука, М., 1982.
9. Френкель Я. И. Сборник избранных трудов, М., 1959, т. III.
10. Хргиан А. Х. Физика атмосферы, Гидрометеиздат, Л., 1978, т. I и II.
11. Hendry A., Antar Y. M. M. Radio Sci., 17, 1243 (1982).
12. Mon J. P. Radio Sci., 17, 953 (1982).

ԱՄՊԵՐՈՒՄ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԱՌԱՋԱՑՄԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐ ՄԵԽԱՆԻԶՄԸ

Հ. Գ. ԲԱԽՇՅԱՆ

Ուսումնասիրված է գեոմեխանիկական ուժերի (ծանրության ուժի, շարժվող ամպերի ուժի) և ամպերում գտնվող ջրի մոլեկուլների միջև փոխազդեցության հնարավոր մեխանիզմը, որը վերջիններիս բերում է էլեկտրականապես բեկոսացած վիճակի: Նշված երևույթը հիմնվում է այն փաստի վրա, որ դանդաղորդ մոլեկուլի ծավալում ունի ոչ սիմետրիկ բաշխում: Բերված են անհրաժեշտ պայմանները, որոնց իրականացման դեպքում ամպերում գեներացվում է էլեկտրական էներգիա:

POSSIBLE MECHANISM FOR THE FORMATION OF ELECTRICITY IN CLOUDS

G. G. BAKHSHYAN

A possible mechanism for the interaction of the geomechanical force (the gravity and forces of moving clouds) with H_2O molecules in clouds is proposed. This model is based on the fact of asymmetric distribution of the mass in the water molecule and asserts that under definite conditions the gravity and forces of moving clouds can mechanically reorient the dipole moments of H_2O molecules and bring them to the electrically polarized state. Necessary conditions are derived, under which the electricity is formed in the clouds.