Math-Net.Ru
Общероссийский математический портал

Н. В. Красногорская, Электричество теплых облаков,
Докл. АН СССР, 1968, том 181, номер 5, 1111–1114

https://www.mathnet.ru/dan34055

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
https://www.mathnet.ru/rus/agreement

Параметры загрузки:
IP: 18.97.14.85
9 декабря 2025 г., 14:33:40

Доклады Академии наук СССР
1968. Том 181, № 5

УДК 551.594.253 **ГЕОФИЗИКА**

Н. В. КРАСНОГОРСКАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ТЕПЛЫХ ОБЛАКОВ

(Представлено академиком Е. К. Федоровым 12 XII 1967)

Электрические свойства облака находятся в непосредственной связи с его метеорологическими характеристиками — фазовым состоянием, микроструктурой, стадией развития и т. д. За последние годы значительно усилилось внимание к исследованию процессов развития теплых облаков. Однако, несмотря на однородность их фазовой структуры, теплые облака недостаточно изучены — не преодолены трудности, связанные с эффективным воздействием на эту форму облачности, и механизм образования осадков в теплых облаках до сих пор является дискуссионным.

Мы сделали попытку подойти к вопросу о формировании осадков в теплых облаках с точки зрения исследования электрических параметров

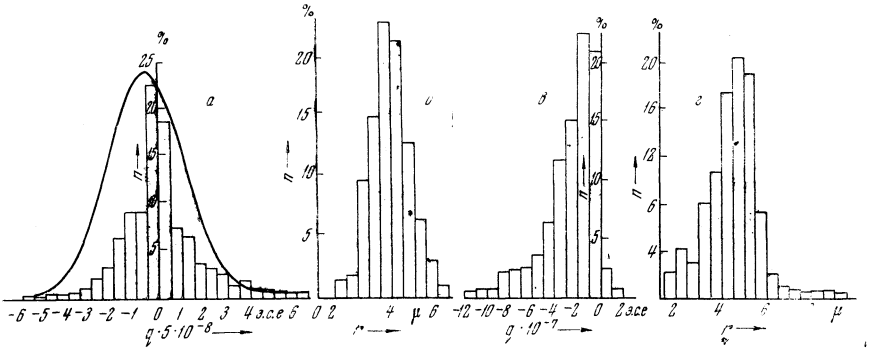

Рис. 1. Распределение частиц по зарядам (*а* и *в*) и по размерам (*б* и *г*) в слоисто-кучевых облаках 22 и 24 VII 1966 г.

облака. В связи с этим в 1966 г. были проведены экспериментальные исследования распределения зарядов облачных частиц, а также градиента потенциала электрического поля в естественных теплых кучевых и слоисто-кучевых облаках мощностью до 1 км. Измерения параметров облачных частиц производились с самолета методом фоторегистрации траекторий их движения в электрическом поле плоского конденсатора ([1]). Заряд частиц определялся по углу отклонения траекторий заряженных частиц в электрическом поле от некоторого фиксированного направления; диаметр частиц в диапазоне от 2 до 30 μ определялся микрофотометрированием следа, образованного ими на фотопленке. Градиент потенциала электрического поля в облаках и их окрестности измерялся динамическими полемерами с ценой деления (на чувствительной шкале) $\gamma = 0{,}01$ в/см на дел.

Измерения зарядов облачных частиц в теплых кучевых и слоисто-кучевых облаках показали, что имеется два типа распределения — симметричное (рис. 1*а*) и асимметричное со сдвигом, как правило, в отрицательную часть спектра (рис. 1*в*). Закон распределения параметров частиц и характер взаимосвязи среднего заряда с размером частиц зависят от координат (или от уровня измерений в облаках) и от стадии развития облака. Средний заряд q капель, как правило, растет с увеличением диаметра d. В общем случае эта зависимость удовлетворительно аппроксимируется уравнением: $q = k_1 d + k_2 d^n$, где k_i и n — постоянные коэффициенты, зависящие от типа облаков и от уровня измерений. При $n = 2$ в наших измерениях k_i изменялись в пределах $0 \leqslant k_1 < 2 \cdot 10^{-4}$ и $0{,}01 < k_2 < 0{,}4$ (если q измеряется в э.с.е., d — в см).

При асимметричном распределении заряд частиц растет с размером быстрее, чем первая степень диаметра, $n > 1$ (рис. 2). В этом случае значение среднего заряда капель больше, чем в той части облаков, где распределение зарядов частиц симметрично.

Электрические поля в теплых облаках невелики — градиент потенциала, как правило, не превышает по абсолютной величине 30 в/см.

Сравнение рассчитанных равновесных значений с экспериментальными данными ([2]) показало, что диффузия и адсорбция ионов, а также индукционный механизм заряжения частиц, движущихся в электрическом поле, могут быть эффективными лишь в начальных стадиях развития облака. В более развитых облаках среднее экспериментальное значение заряда капель больше равновесного значения, рассчитанного в предположении любого механизма взаимодействия ионов с облачными каплями. Следовательно, должны существовать другие механизмы, которые обеспечили бы более быстрый рост заряда, чем диффузионные процессы.

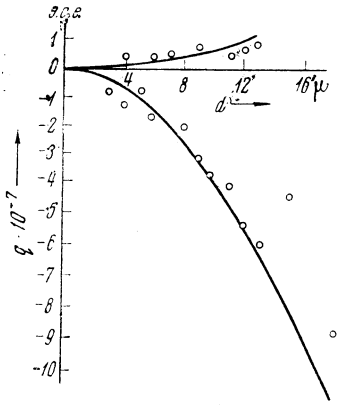

Рис. 2. Зависимость средних значений зарядов от размеров капель в слоисто-кучевых облаках 24 VII 1966 г. $q_+ = 0{,}07\,d^2$; $q_- = 0{,}36\,d^2$

Облачные спектры по размерам, особенно в начальных стадиях развития облака, имеют небольшую дисперсию. Следовательно, укрупнение частиц может происходить в основном за счет слияния капель сравнимых размеров. Увеличение заряда капель при их коагуляции возможно лишь в том случае, если сливаются одноименно заряженные частицы. Измерения зарядов в теплых облаках подтвердили полученный ранее ([2, 3]) вывод о том, что, наряду с наличием смеси зарядов обоих знаков, в облаках имеются области преимущественно одноименно заряженных частиц. Следовательно, в естественных облаках существуют объективные условия, способствующие коагуляции одноименно заряженных капель, если электрические силы не будут препятствовать их сближению. Необходимо в связи с этим исследовать вопрос о влиянии электрических сил в естественных облаках на коагуляцию капель.

Коагуляция капель, вообще говоря, является процессом нестационарным, зависящим от многих физических факторов, поэтому расчет коагуляционного роста частиц, особенно сравнимых размеров, является весьма сложной задачей, решение которой (даже численное) возможно лишь при некоторых упрощающих предположениях.

Прежде всего следует учесть, что коагуляция частиц в теплых облаках состоит из двух элементарных актов — столкновения частиц (что зависит от внешних полей и от электрического и гидродинамического воздействий) и слияния частиц (что зависит от дефицита влажности и условий на поверхности капель). Так как эффективности столкновения и слияния капель определяются различными силами и разными условиями, то мы сочли возможным рассматривать влияние электрических сил на столкновение и слияние капель независимо.

Для расчетов коагуляции нами были использованы экспериментальные данные распределения частиц по размерам и зарядам, полученные в естественных кучевых облаках в свободной атмосфере. Эффективность столкновения как функция размеров частиц и электрических параметров была получена теоретически путем численного решения системы дифференциальных уравнений движения заряженных и нейтральных частиц в поле тяжести и в электрическом поле ([4]).

Расчеты эффективности столкновения выполнялись при следующих предположениях: 1) капельки в облаке достаточно удалены друг от друга,

так что можно рассматривать парные столкновения, не учитывая влияния других частиц; 2) облачные капли являются проводящими сферами и не меняют при движении своей формы; 3) частицы движутся в вязкой среде, в однородном электрическом и гравитационном полях, турбулентное и броуновское движение не учитывалось; 4) бóльшая часть расчетов выполнялась для частиц сравнимых размеров по уравнениям, где гидродинамическое взаимодействие представлено выражениями, данными Хоккингом ([5]), которые справедливы для отношений диаметров в интервале $0{,}2 < d_2/d_1 < 0{,}8$; 5) для расчета электрических сил было использовано математическое представление компонент электрических сил, данное Девисом ([6]) для двух проводящих сфер в однородном электрическом поле.

Поскольку численный расчет эффективности столкновения по уравнениям, составленным с полным учетом электрических сил ([6]), чрезвычайно сложен, то в зависимости от комбинаций заданных параметров бóльшая часть расчетов проведена по уравнениям с приближенным учетом электрических сил ([4]).

Выполненные нами исследования эффективности столкновения частиц сравнимых размеров ([4], [7]) показали, что в реальных условиях, которые часто встречаются в естественных кучевых и, тем более, в грозовых облаках, электрические силы будут приводить к столкновению облачные капли как раз в той области размеров, в которой в отсутствие электрических сил столкновений не происходило бы. Существенно, что даже слабые электрические поля и небольшие заряды, которые часто встречаются в естественных облаках, приводят капли в столкновение ([8]). Этот вывод справедлив и для одноименно заряженных капель, причем чем ближе размеры заряженных капель, тем больше эффективность столкновения.

Для рассмотрения вопроса о том, не будут ли электрические силы препятствовать слиянию капель после их столкновения, целесообразно ввести параметр, характеризующий соотношение электрической энергии U_q и энергии поверхностного натяжения U_σ. Для всех реальных значений зарядов на каплях это соотношение $U_q / U_\sigma \ll 1$. Следовательно, несмотря на значительную роль электрических сил в столкновении капель, в эффективности их слияния решающую роль будут играть силы поверхностного натяжения. В расчетах электрической коагуляции облачных капель мы принимали коэффициент слияния $\alpha = 1$, т. е. считали, что после каждого столкновения наступает слияние.

В качестве примера расчета коагуляции капель рассмотрим задачу воздействия на тепловые облака электризованным реагентом с целью рассеяния облачности или вызывания осадков.

Пусть объектом воздействия является стабильное мелкокапельное облако, которое по всему объему характеризуется симметричным распределением по зарядам * (рис. 1*а*, *б*). Максимальный диаметр $d_{max} = 14$ μ; средний диаметр $d_{ср} = 8$ μ; число частиц в единице объема $n = 700$ см$^{-3}$, рассчитанная водность $\omega = 0{,}2$ г/м^3; средняя плотность объемного заряда $\rho = -1 \cdot 10^{-8}$ э.с.е/см^3, что на 2 порядка ниже плотности, которая встречается в развитых облаках. Средняя напряженность электрического поля $E = 0{,}5$ в/см.

Допустим для простоты, что заданная плотность распределения частиц $n(q, d)$ характеризует облако в целом и не изменяется ни в пространстве, ни во времени. Рассмотрим эффект, который вызывает введенный в облако мелкодисперсный электризованный реагент со средним диаметром частиц $d_0 = 20$ μ и с зарядом $q_0 = 10^{-4}$ э.с.е. Расчет роста частицы реагента со временем целесообразно вести лишь до размера порядка 30—50 μ в диаметре, после чего основную роль в образовании крупных капель будет играть гравитационная коагуляция.

---

* Функция распределения умышленно взята с небольшой дисперсией (рис. 1*б*), чтобы возможность образования осадков за счет гравитационного роста частиц была исключена.

Поскольку заряд и размер частицы реагента при движении через облако изменяются, то значение эффективности столкновения будет также функцией времени, поэтому весь интервал изменения заряда и размера падающей через облако капли был разбит на ряд участков, в каждом из которых эффективность столкновения и функция распределения считались неизменными как во времени, так и в пространстве. Суммарный эффект получался путем интегрирования по всем слоям, на которые разделено облако.

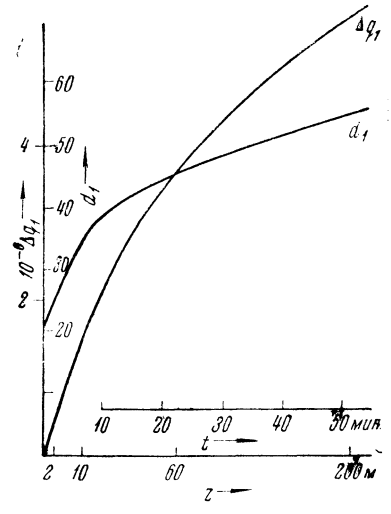

Рис. 3. Расчетные кривые изменения размера и приращения заряда на частице реагента, введенного в мелкокапельное облако

Если не учитывать влияния турбулентности на эффективность столкновения частиц (которая лишь увеличивает число столкновений), то приращения диаметра Δd_1 и заряда Δq_1 выразятся следующим образом:

$$\Delta d_1 = \frac{\pi}{12} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{0}^{\infty} N(q, d)\, d^3\, dq\, dd,$$

$$\Delta q_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{0}^{\infty} N(q, d)\, q\, dq\, dd,$$

где $N(q, d) = \frac{\pi\alpha}{4} n(q, d) \int_{0}^{H} K d_1^2(z)\, dz;$

H — толщина слоя облака, через которое падает капля; $K(q_1, q_2, d_1, d_2, E)$ — эффективность столкновения, q, d — заряд и диаметр облачных капель.

Результаты расчета показали, что. несмотря на неблагоприятные условия укрупнения частиц в облаке (мелкодисперсность и малая водность), рост частиц от 20 до 40 μ происходит за конечное время порядка 12 мин., при этом заряд частицы реагента изменяется на $\Delta q = -2 \cdot 10^{-6}$ э.с.е. (рис. 3).

Таким образом, если в естественном мелкокапельном облаке в результате искусственного вмешательства или естественного процесса появятся частицы с достаточно большими зарядами, то укрупнение частиц в облаках начнется в области меньших размеров, чем это возможно при гравитационном росте.

Если учесть, что при разрушении капли электризуются, то электрическая коагуляция в сочетании с гравитационным ростом может привести к образованию внезапных сильных ливней, часто наблюдающихся при развитии кучево-дождевой и грозовой облачности. Результаты теоретических исследований процесса роста частиц в теплых облаках согласуются с результатами наблюдений Воннегата и сотрудников ([9]), которые показали, что электрическая активность возникает в облаке раньше, чем образуются крупные капли, в результате чего, с их точки зрения, грозовая электризация является причиной (а не следствием) образования осадков.

Институт
прикладной геофизики

Поступило
15 XI 1967

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Г. Д. Петров, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 11 (1959). [2] Н. В. Красногорская, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1 (1960). [3] N. V. Krasnogorskaja, The Role of Electric Forces in Precipitation Formation, Problems of Atm. and Space Electricity, 1965. [4] Н. В. Красногорская, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 3 (1965). [5] L. M. Hocking, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., № 85 (1959). [6] M. H. Davis, Quart. J. Mech. and Appl. Math., 17, 4 (1964). [7] Н. В. Красногорская, Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 4 (1965). [8] Н. В. Красногорская, Метеорология и гидрология, № 3 (1967). [9] B. Vonnegut, C. B. Moore, A. T. Botka, J. Geophys. Res., 64, № 3 (1959).