

ПРОСТРАНСТВЕННО УПОРЯДОЧЕННЫЕ СТРУКТУРЫ ИЗ КАПЕЛЬ ВОДЫ В АТМОСФЕРНЫХ ОБЛАКАХ

А.В. Шавлов, В.А. Джуманджи, С.Н. Романюк

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, shavlov@ikz.ru

Представлены результаты лабораторных измерений геометрических и электрических параметров пространственно упорядоченных структур из заряженных капель воды. Рассмотрена возможность образования подобных структур в атмосферных облаках и туманах. Оценено влияние капельного упорядочения на поверхностное натяжение и сдвиговую вязкость облаков.

В космосе, околоземном пространстве, атмосфере Земли присутствует большое количество заряженных пылевых частиц, которые образуют так называемую пылевую плазму. При определенных условиях, подобно атомам и молекулам, пылевые частицы могут формировать упорядоченные структуры, характерные для кристаллов или жидкостей [Фортон и др., 2004]. Вследствие возникновения таких структур пылевая плазма проявляет себя как неньютоновская жидкость. Во-первых, существует критическое сдвиговое напряжение, ниже которого течение в пылевой плазме отсутствует. Во-вторых, уменьшается коэффициент сдвиговой вязкости с ростом сдвигового напряжения. Согласно лабораторным измерениям [Ворона и др., 2007], вклад упорядоченного пылевого компонента в коэффициент сдвиговой вязкости пылевой плазмы может достигать десятков процентов и более.

В недавней работе [Shavlov, Dzhumandzhi, 2010] было сделано предположение о том, что заряженные капли воды и кристаллы льда, содержащиеся в облаках и туманах, также могут образовывать пространственно упорядоченные структуры и влиять на физико-механические свойства атмосферы. Существование капельных структур в лабораторных условиях было продемонстрировано в [Федорец, 2004]. Согласно данной работе, регулярная структура из водяных капель возникала над подогретой поверхностью воды. Капли воды диаметром в несколько десятков микрометров располагались в одном слое с гексагональным упорядочением относительно друг друга. Расстояние между каплями равнялось двум-пяти капельным диаметрам. Высота положения капельного слоя над поверхностью воды была сравнима с диаметром капель.

В связи со способностью капель воды к пространственному упорядочению нами были поставлены задачи измерения заряда капель внутри капельной структуры, расчета поверхностного натя-

жения структуры, а также ее сдвиговой вязкости, оценки возможного влияния данных структур на свойства атмосферных облаков и туманов.

Для получения капельных структур использовалась методика, близкая к описанной в работе [Федорец, 2004]. На рис. 1 представлен типичный вид капельной структуры. Структура имеет округлую форму, что свидетельствует о наличии у нее поверхностного натяжения. На рис. 2 приведены зависимости межкапельного расстояния L , диаметра D , высоты H капель над поверхностью воды, а также заряда капель Z (в единицах элементарного заряда) от температуры воды T . Геометрические характеристики капель определили по количеству пикселей на видеоизображении, затем пересчитали в единицы длины. Погрешность составила $\pm 0,5$ пиксел, или ± 2 мкм. Высоту H определяли как половину видимого расстояния между центрами капли и ее зеркального изображения в воде при угле зрения, близком к касательному к поверхности воды. Заряд капли определяли по относительному изменению высоты капель $\Delta H/H$ при включении внешнего электрического поля E_{ex} между водой и электродом, расположенным над капельной структурой. Для этого использовалась формула

$$Z = \frac{Mg}{eE_{ex}} \frac{\Delta H}{H},$$

которая может быть получена из условия электрогравитационного равновесия заряженной капли над одноименно заряженной поверхностью воды:

$$Mg = Ze(E + E_{ex}),$$

где E – поле, создаваемое заряженной поверхностью воды (зависящее от высоты как $E \sim 1/H$); M – масса капель; g – ускорение свободного падения; e – элементарный заряд. Погрешность определения заряда составила $\pm 15\%$. Погрешность определения температуры поверхности воды равнялась $(+1/-10)^\circ\text{C}$.

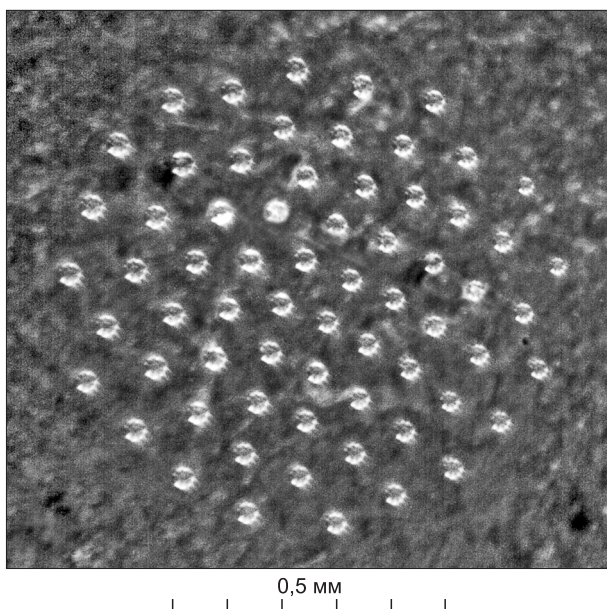


Рис. 1. Плоская пространственно упорядоченная структура из капель воды.

На рис. 2 видно, что все указанные величины уменьшаются с понижением температуры. При этом в диапазоне исследованных температур 60–100 °С экспериментально установлены следующие закономерности:

$$D \approx 1,26H, L \approx 4,8H, Z \sim D^4.$$

Заряд Z капель, а также заряд поверхности воды положительны. Знак заряда, по-видимому, определяется преимущественным переносом гидроксид-ионов по сравнению с ионами водорода из воды в пар при испарении. Заряд Z изменяется в зависимости от диаметра D капли быстрее, чем D^2 . Это свидетельствует о том, что заряд зависит не только от площади поверхности капли, которая пропорциональна D^2 , но, вероятно, и от скорости фазового перехода вода–пар.

Расстояние L между каплями, по нашему предположению, равно двум радиусам экранирования Дебая (L_D) в паре:

$$L = 2L_D.$$

Для проверки этого предположения с помощью уравнения Дебая для случая плоской заряженной поверхности воды была рассчитана концентрация носителей заряда в паре и вычислена длина Дебая. Получили теоретическую зависимость $L = 2,7H$, в которой численный коэффициент 2,7 по порядку величины совпадает с коэффициентом 4,8 в экспериментальной зависимости $L \approx 4,8H$. Это, по нашему мнению, является приемлемым подтверждением высказанного предполо-

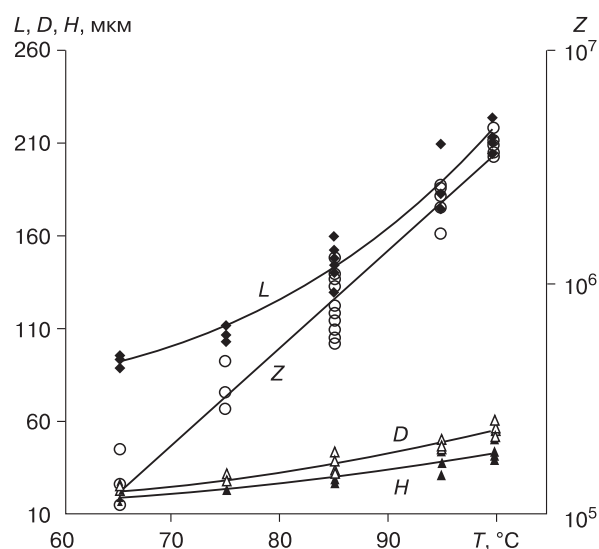


Рис. 2. Зависимости межкапельного расстояния L , диаметра капель D , высоты над поверхностью воды H и заряда капель Z от температуры T .

жения. В частности, для пылевой плазмы позиционирование частиц на расстоянии $2L_D$ друг от друга было подтверждено экспериментально [Фортвов и др., 2004], а также показано теоретически [Shavlov, Dzhumandzhi, 2010].

Воспользуемся связью величин L и L_D для оценки возможности существования капельных структур в атмосферных объектах (облаках и туманах). Вычислим теоретическое значение концентрации капель в упорядоченном состоянии и сравним его с опытным значением концентрации капель в облаках. Для этого по электропроводности атмосферного воздуха $a = 10^{-13} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ и среднему значению коэффициента диффузии ионов $B = 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ [Бабичев и др., 1991] найдем радиус Дебая

$$L_D = (\epsilon_0 B/a)^{0,5} = 10^{-3} \text{ м},$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная.

Далее определим значение концентрации капель $N = (2L_D)^{-3} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$. Сравним его со среднестатистическим значением концентрации капель в облаках и туманах, составляющим $N = 3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ [Облака..., 1989]. Порядок величин концентраций одинаков. Таким образом, капли в облаках и туманах действительно могут быть пространственно упорядочены.

Оценим поверхностное натяжение капельной структуры по формуле [Shavlov, Dzhumandzhi, 2010]

$$\sigma = \frac{e^2}{24\epsilon_0} Z^2 N.$$

Заряд Z капель в облаках достигает значений 10^3 – 10^6 [Бабичев и др., 1991]. Например, при $Z = 10^4$ получим $\sigma = 10^{-11}$ Дж/м². При помощи найденной величины σ определим устойчивости поверхности капельной структуры к сдвиговому течению. Воспользуемся для этого критерием Кельвина–Гельмгольца, при выполнении которого поверхность устойчива:

$$\frac{\rho v^2}{2} \leq \frac{2\pi}{x} \sigma,$$

где $\rho = 1$ кг/м³ – плотность воздуха; $v = \frac{\partial v}{\partial l} l$ – разность скоростей среды по обе стороны от поверхности раздела; $\frac{\partial v}{\partial l} = 3 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹ – средний градиент горизонтальной скорости среды по нормали к земной поверхности; $l = 10^{-3}$ м – толщина поверхностного слоя капельной структуры, равная радиусу Дебая; x – характерная длина, на которой развивается неустойчивость.

Отсюда получим $5 \cdot 10^{-12} \leq 10^{-10}/x$. Данное неравенство выполняется при $x < x_0 = 20$ м.

Таким образом, поверхность капельной структуры в облаке может быть устойчива к сдвиговым течениям при размерах облака, не превышающих несколько десятков метров. При больших размерах поверхность приобретает шероховатость с характерным размером x_0 . Из сказанного следует, что возникновение капельных структур может играть важную роль в устойчивости формы облаков.

Оценим коэффициент сдвиговой вязкости η капельной структуры и сравним его с вязкостью воздуха. Для этого воспользуемся формулой, подобной формуле Френкеля [Фабелинский, 1997]:

$$\eta = C \exp\left(\frac{U}{kT}\right),$$

где $C \sim hN$; h – постоянная Планка; N – концентрация частиц; U – энергия активации вязкости; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Примем за основу дислокационный механизм сдвигового течения, характерный для кристаллов. В металлических и ионных кристаллах, как известно, энергия активации смещения дислокаций U в 10^3 – 10^4 раз меньше энергии связи атомов U_b . Для численного описания вязкости пылевого кристалла с помощью приведенной выше формулы необходимо, чтобы U была в 1500 раз меньше, чем $U_b = Z^2 kT/6$ [Shavlov, Dzhumandzhi, 2010]. Для оценки вязкости капельной структуры используем аналогичную величину энергии активации $U = U_b/1500$. При $Z = 10^4$ получим $\eta = 10^{-23}$ Па·с. Это малая величина по сравнению с вязкостью воздуха, которая равна 10^{-5} Па·с. Но уже при $Z = 10^5$ вязкость капельной структуры может воз-

расти до значений, сравнимых с вязкостью воздуха или превышающих ее.

Увеличение вязкости может приводить к уменьшению величины конвективной теплопроводности. Так, для целого ряда задач о конвекции

число Рэлея $R = \frac{g\beta A d^3}{\chi\mu}$ может характеризовать

условие устойчивости газа в поле силы тяжести при наличии градиента температуры A , направленного вниз. Здесь β – коэффициент температурного расширения; χ – температуропроводность газа; μ – кинематическая вязкость; d – характерный линейный размер структуры. Изменение вязкости может влиять на наличие или отсутствие свободной конвекции и на скорость переноса тепла.

Таким образом, наличие капельной структуры в атмосферном облаке может существенно изменить гидродинамику и интенсивность теплопереноса в нем. В облаках, содержащих ледяные кристаллы, этот эффект может быть более выраженным, так как заряд ледяных кристаллов, как правило, в десятки раз превышает заряд водяных капель.

Существование пространственно упорядоченных капельных структур и структур из ледяных кристаллов в атмосферных облаках и туманах, а также их влияние на механические и теплофизические свойства облаков представляется вполне реальным явлением. Оно заслуживает тщательного изучения не только в рамках физики атмосферы, но и криологии Земли, поскольку наука криология непосредственно занимается изучением объектов, в которых вода находится вблизи точки замерзания или представлена в твердом состоянии.

Литература

- Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.** Физические величины: Справ. / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., Энергоиздат, 1991, 1232 с.
- Ворона Н.А., Гавриков А.В., Иванов А.С. и др.** Вязкость плазменно-пылевой жидкости // ЖЭТФ, 2007, т. 132, вып. 4, с. 941–948.
- Облака и облачная атмосфера:** Справ. / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л., Гидрометеиздат, 1989, 647 с.
- Фабелинский И.Л.** О макроскопической и молекулярной сдвиговой вязкости // Успехи физ. наук, 1997, т. 167, № 7, с. 721–733.
- Федорев А.А.** Капельный кластер // Письма в ЖЭТФ, 2004, т. 79, вып. 8, с. 457–459.
- Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. и др.** Пылевая плазма // Успехи физ. наук, 2004, т. 174, № 5, с. 495–544.
- Shavlov A.V., Dzhumandzhi V.A.** Spatially ordered structures in storm clouds and fogs // Phys. Lett. A., 2010, vol. 374, p. 2561–2565.

Поступила в редакцию
15 февраля 2011 г.