

## Группировка дождевых и облачных капель при ветровых порывах

В.В.Стерлядкин, К.В.Куликовский, М.А.Кононов

*Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники*

*МИРЭА, 107996, г. Москва, ул. Стромынка, д.20, e-mail: [sterlyadkin@mail.ru](mailto:sterlyadkin@mail.ru)*

*Получены экспериментальные данные, указывающие на пространственную селекцию дождевых капель по размерам. Представлены расчёты, доказывающие, что причиной этого являются ветровые порывы и турбулентные неоднородности. Показано что плоский порыв ветра приводит к группировке капель различного размера на разных расстояниях от фронта. В облаках это должно приводить к кластеризации – повышению концентрации капель в отдельных областях в тысячи раз. Это должно приводить к резкому возрастанию скорости формирования капель осадков. Обсуждается влияние кластеризации на сечение обратного рассеяния при радиолокационном зондировании.*

*Our experimental data indicate a spatial selection the raindrops by the size. The calculations showing that the reasons for this are wind gusts and turbulent inhomogeneity are presented. It is shown that the flat wind gust leads to a group of droplets of different sizes at different distances from the leading front. In the clouds, this should lead to clustering - increased concentration of droplets at thousands of times in some space areas. This should lead to a sharp increase in the rate of formation of rain drop. The influences of clustering on microwave scattering are discussed.*

Процессам кластеризации инерционных частиц в турбулентных потоках посвящены десятки теоретических трудов [1-3]. Однако экспериментальных исследований в этом направлении очень мало. Особенно это относится к метеорологическим задачам о распределении гидрометеоров в пространстве.

В натуральных экспериментах нам удалось зарегистрировать необычные процессы расслоения капель по размерам [4]. Измерения основывались на эффекте аномально высокой модуляции света, рассеянного вибрирующими дождевыми каплями, описанном в наших более ранних работах [5,6]. Данный эффект является очень мощным инструментом, позволяющим регистрировать 5-ти микронные деформации дождевых капель с расстояния в 5 метров. При фотографировании дождевых капель с периодичностью 1-1,5 секунды в поле снимка появляются капли то одного, то другого, размера. Причем эти изменения происходили за очень короткие промежутки времени, длительностью 1-2 секунды. Описанные процессы можно назвать пространственной селекцией капель по размерам.

В данной работе мы рассмотрим возможные механизмы пространственной группировки рассеивателей по размерам, связанные с появлением порывов ветра и турбулентностью.

На первом этапе рассмотрим простую схему горизонтального бокового порыва. Пусть в пространстве имеется некоторое распределение капель по размерам  $N(D)$ , однородное в пространстве. Будем также считать, что горизонтальные скорости движения капель в начальный момент времени равны нулю, т.е. имеется только вертикальное перемещение, которое мы не рассматриваем. Пусть в некоторый начальный момент времени появляется локальный горизонтальный порыв ветра, который имеет вертикальные передний и задний фронты и перемещается по оси  $x$  с

постоянной скоростью  $V_{п.}$ . Протяженность ветрового порыва по горизонтали  $l_0$ . Инерционные частицы, которых достиг передний фронт, будут испытывать горизонтальную силу трения  $F_{тр}$  за счет относительного движения воздуха  $V_{отн} = V_{п.} - V$ , которая начнет разгонять частицу до тех пор, пока ее скорость  $V$  не станет равной скорости порыва. Процесс можно описать уравнением движения:

$$m \frac{dV}{dt} = F_{тр}(V_{отн}) \quad (1)$$

где  $m$  – масса капли, а сила трения определенным образом зависит от  $V_{отн}$  – скорости обтекания капли горизонтальным ветровым потоком.

Известно, что вид зависимости силы трения  $F_{тр}$  от скорости обтекания капли воздушным потоком  $V_{отн}$  определяется характером обтекания, который можно характеризовать критерием Рейнольдса  $Re = V_{отн} D \rho / \eta$ , где  $\rho$  — плотность воздуха;  $\eta$  — динамический коэффициент вязкости воздуха,  $D$  – диаметр капли. При числах Рейнольдса меньших 1 режим обтекания ламинарный, и сила сопротивления линейно зависит от скорости обтекания. При  $Re > 700$  зависимость становится квадратичной, а в промежуточном интервале  $1 < Re < 700$ , который как раз характерен для дождевых капель, имеет место переходная зависимость.

#### Уравнение движения и группировка облачных капель

Для облачных частиц, диаметр которых обычно принимается менее 0,1 мм число Рейнольдса не превышает 1, режим обтекания ламинарный, а зависимость силы сопротивления от скорости обтекания имеет линейный характер  $F_{тр} = AV$ , где коэффициент пропорциональности  $A(D) = 3\pi\eta D$  линейно растёт с увеличением диаметра частиц (формула Стокса).

Уравнение движения для малых капель диаметром  $D < 0,1$  мм имеет вид:

$$m \frac{dV}{dt} = A(D) \cdot V_{отн}, \quad (2)$$

где  $m$  — масса капли.

Учтём граничные условия. Будем полагать, что начальным моментом времени является момент, когда фронт порыва достигает каплю. Напомним, что мы рассматриваем только горизонтальное движение. В этот момент горизонтальная скорость капли равна нулю:  $V(t=0) = 0$ , а скорость относительно окружающего воздуха  $V_{отн} = V_{п.} - V$  скачком возрастает от нуля до скорости порыва  $V_{п.}$ . При таких граничных условиях решение уравнения (2) имеет вид:

$$V = V_{п.} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (3)$$

где  $\tau = m/A(D)$  — характерное время увлечения капли воздушным потоком.

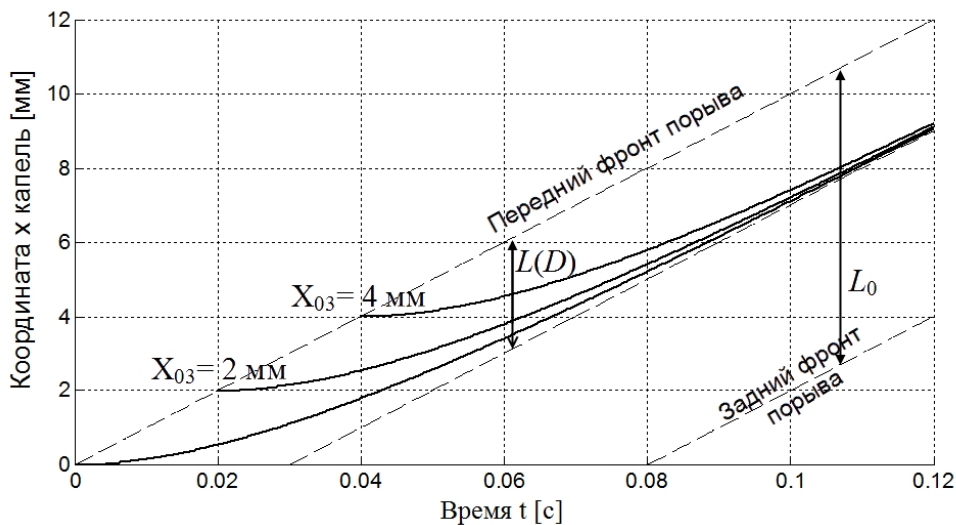
Уравнение (3) описывает увлечение капель обтекающим потоком и экспоненциальное нарастание их горизонтальной скорости до скорости порыва  $V_{п.}$ . Интегрируя (3) по времени получим траекторию движения  $i$ -й капли, попавшей в боковой порыв:

$$X_i = [X_{0i} + V_{п.} t] - V_{п.} \tau \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (4)$$

где  $X_{0i}$  — начальное положение капли в момент пересечения фронта порыва, а время для каждой капли отсчитывается с этого же момента.

На рис. 1 изображены траектории капель диаметром  $D = 0,1$  мм, подхваченных порывом в различных точках  $X_{0i}$  пространства при скорости порыва  $0,1$  м/с.

Из графика видно, что порыв разгоняет капли за характерное время  $\tau$ , подхватывает их и группирует все капли данного размера в одной плоскости, которая отстоит от фронта порыва на расстоянии  $L(D) = V_{п}\tau$ . После захвата все капли движутся в своих слоях со скоростью порыва. Таким образом, капли различного диаметра по мере движения бокового порыва накапливаются в различных плоскостях, создавая очень высокую концентрацию одинаковых по размеру частиц. В результате перемещения бокового порыва по некоторой области пространства равномерная картина заполнения пространства частицами, превращается в слоистую структуру частиц, собранных в определённых плоскостях. Этот процесс, очевидно, можно назвать пространственной селекцией капель по размерам.



**Рис. 1. При порыве ветра все капли диаметром  $D$ , находящиеся в различных начальных координатах  $X_{0i}$ , накапливаются в одной плоскости на расстоянии  $L(D)$  от переднего фронта ветрового порыва. Капли другого диаметра накопятся в другой плоскости.**

Оценим масштабы происходящих процессов. Время группировки для капли диаметром  $0,1$  мм имеет характерный масштаб  $\tau$ , составляющий  $0,03$  с, а для капли диаметром  $10$  мкм время увлечения  $\tau = 3 \cdot 10^{-4}$  с. С увеличением диаметра капель время увлечения и расстояние  $L(D)$  от фронта до плоскости группировки растет пропорционально квадрату диаметра и для  $D = 0,1$  мм и скорости порыва  $V_{п} = 0,1$  м/с  $L(D)$  составляет  $3$  мм, а для  $1$  мкм капель —  $L(D) = 30$  мкм.

В облаках процесс группировки весьма эффективен. Рассмотрим, к примеру, облако, в котором основная часть капель имеет размер от  $10$  до  $20$  мкм. При попадании в порыв, время жизни которого  $\tau_{п}$  составляет  $1$  секунда, а относительная скорость перемещения  $V_{п} = 0,1$  м/с, все капли из области пространства протяженностью  $V_{п}\tau_{п} = 0,1$  м через время  $\tau_{п}$  соберутся в слое  $\Delta L = L(20\text{мкм}) - L(10\text{мкм}) = 90$  мкм. Масштаб увеличения концентрации частиц при таком процессе можно оценить как  $V_{п}\tau_{п}/\Delta L$ . В рассматриваемом случае облачных капель эта величина составит более  $10^3$ ! Среднее расстояние между каплями при этом уменьшится в  $10$  раз. Если затем турбулентный порыв происходит в другом направлении, то по другой координате произойдет аналогичный процесс и расстояние в итоге уменьшится в  $100$  раз. Учитывая, что обычное расстояние между облачными каплями составляет масштаб  $1$  мм, получим, что при турбулентных пульсациях среднего масштаба концентрация облачных капель

возрастает настолько значительно, что капли на некоторых участках попросту начинают соприкасаться друг с другом. Очевидно, что это будет приводить к коагуляции и появлению дождевых частиц. Данную картину отчасти можно сравнить с работой «дворников» на лобовом стекле автомобиля, когда мелкие капли с большой плоскости группируются на линии «дворника». Аналогично, все капли из значительного объема пространства группируются в тонком слое на расстоянии  $L(D)$  от фронта.

Неоднородность фронтов и их изменчивость, конечно, разрушают идеальную картину накопления, однако, для небольших участков рассмотренный механизм будет выполняться.

Чем интенсивнее турбулентное движение или восходящие термические потоки, тем выше концентрация частиц в отдельных элементах пространства и тем выше степень кластеризации рассеивателей. Можно с уверенностью сказать, что именно турбулентность или вертикальные потоки являются спусковым механизмом возникновения дождевых капель в облаках.

### Влияние кластеризации рассеивателей на интерпретацию радиолокационных данных

Следствием группировки капель размерам в различных областях пространства может являться аномальная, по сравнению с рэлеевским законом, зависимость сечения обратного рассеяния от длины волны.

Рассмотрим этот механизм качественно на схеме, представленной на рис. 2. При случайном равномерном распределении рассеивателей вдоль направлении зондирования, рис. 2а, амплитуда результирующего сигнала растёт пропорционально  $(N)^{1/2}$ , где  $N$  — число слагаемых. В результате происходит обычное некогерентное сложение сигналов, при котором принимаемая мощность растёт пропорционально  $N$ . В случае пространственной группировки на участке протяжённостью  $\Delta l \ll \lambda$ , происходит почти когерентное сложение сигнала, как это показано на рис. 2б. Амплитуда  $E_{рез}$  и мощность принимаемого сигнала при этом резко возрастают, как это представлено на соответствующей векторной диаграмме.

Простую оценку возможного влияния кластеризации капель на рассеяние микроволнового излучения можно получить из упрощённой модели сигнала, сформированного совокупностью  $N$  одинаковых частиц. При равномерном случайном распределении частиц в пространстве суммарная мощность сигнала будет пропорциональна  $NP_0$ , где  $P_0$  — мощность сигнала от одного рассеивателя.

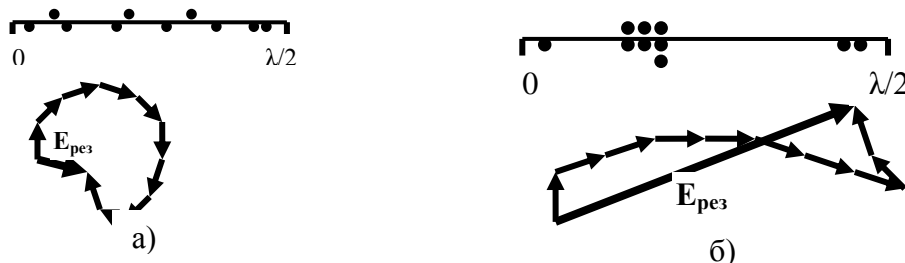


Рис. 2. Вверху — распределение рассеивателей вдоль радиолокационного луча на участке протяжённостью  $0 \dots \lambda/2$ , снизу — сложение сигналов на векторной диаграмме: а) — сложение сигналов от рассеивателей при случайно однородном распределении вдоль линии зондирования; б) — сложение сигналов при группировке частиц на участке протяжённостью  $\Delta l$  много меньшей, чем  $\lambda$ .

Если все частицы разделились на компактные кластеры по  $M$  рассеивателей, а кластеры случайно расположены в пространстве, то сигнал будет пропорционален произведению числа кластеров  $N/M$  на мощность сигнала от каждого кластера  $P_0 M^2$ . В результате при такой модели кластеризации мощность сигнала будет пропорциональна  $MNP_0$ , т.е. возрастает в  $M$  раз. Подробное рассмотрение аналогичной задачи было проведено Л.А. Домбровским и Л.И. Зайчиком [1]. В цитируемой работе рассматривалась упрощённая модель группировки частиц по  $M$  единиц в кластерах сферической формы, радиус которых мал по сравнению с длиной волны. Для такой модели получены аналогичные оценки увеличения мощности сигнала в  $M$  раз.

Заметим, что при уменьшении длины волны накопление сигнала может вновь стать некогерентным, поскольку протяжённость области группировки может становиться сравнимой  $c\lambda/2$ , и векторная диаграмма «замыкается» почти в окружность, результирующая у которой растёт вновь некогерентно, пропорционально  $(N)^{1/2}$ . Данный факт изменения степени когерентности и режима формирования сигнала с длиной волны, по-видимому, может быть эффективно использован для изучения процессов кластеризации.

### **Заключение**

Таким образом, ветровые порывы и турбулентность приводят к группировке, пространственной селекции частиц по размерам и возникновению кластерной структуры с резкими неоднородностями распределения частиц в пространстве. Чем интенсивнее порывы и крупномасштабная турбулентность, тем выше степень кластеризации и неоднородность распределения рассеивателей. Очевидно, что с точки зрения физики формирования сигналов в радарной метеорологии это очень важное заключение, поскольку механизм формирования радиолокационного сигнала от гидрометеоров (степень когерентности рассеяния) оказывается тесно связанным с динамикой атмосферы. В частности, Z-I соотношение между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью осадков должно учитывать динамическое состояние атмосферы.

Рассмотренный механизм пространственной группировки весьма эффективен для облачных частиц, диаметром до 0.1 мм. Оценки показывают, что концентрация облачных частиц за счет такого механизма может возрасти в тысячи раз, что, несомненно, резко увеличивает вероятность быстрого роста размеров капель. Вероятно, можно считать, что интенсификация турбулентных движений или восходящих потоков в облаках является «спусковым» механизмом появления осадков.

### **Литература**

1. Домбровский Л.А., Зайчик Л. И. Влияние кластеризации частиц на рэлеевское рассеяние излучения в турбулентном потоке // Теплофизика высоких температур. 2009. — Т. 47. — Вып. 4. — С. 619 – 626.
2. Squires K.D., Eaton J.K. Preferential Concentration of Particles by Turbulence // Phys. Fluids A., 1991. — V 3. — N 5. — P. 1169.
3. Falkovich G., Fouxon A., Stepanov M.G. Acceleration of rain initiation by cloud turbulence // Nature, 2002. — V. 419. — P. 151 – 154.
4. Стерлядкин В.В., Куликовский К.В. Пространственная селекция рассеивателей по размерам при ветровых порывах.// Труды XXIII симпозиума по радиолокационному зондированию природных сред. 2013. . —С-П. —С.400 - 405.
5. Стерлядкин В.В. Натурные измерения колебаний капель осадков // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1988. — Т. 24. — № 6. — С. 613 – 621.

6. Стерлядкина Е.А., Стерлядкин В.В. Рассеивающие свойства вибрирующих капель  
// Оптика и спектроскопия, 1988. — Т. 64. — Вып. 3. — С. 685–688.