

Л. М. ЛЕВИН и Р. Ф. СТАРОСТИНА

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ОБЛАКОВ

(Представлено академиком О. Ю. Шмидтом 1 VII 1953)

В июне — ноябре 1951 г. в Эльбрусской высокогорной экспедиции Геофизического института АН СССР проводились комплексные исследования структуры облаков. В частности, исследовалась микроструктура облаков совместно с наблюдениями над визуальной видимостью. Исследование микроструктуры облаков производилось методом улавливания облачных капель<sup>(1)</sup>.

Ловушка экспедиции, названная «поточной ловушкой», имела в качестве заборного препятствия стеклянную пластинку, помещенную в трубу. В трубе с помощью вентилятора создавался стационарный поток воздуха, засасываемого из облака. Затвор, прикрывающий пластинку, позволял дозировать время оседания капель на пластинку. Облачные капельки, осевшие на тонкий слой масла, покрывающий пластинку, фотографировались, а затем на фотографии подсчитывалось число капель разных размеров. Стационарность потока, обтекающего пластинку, позволяет путем учета коэффициента захвата<sup>(2)</sup>, времени экспозиции и площади фотографируемого кадра установить число частиц данного размера в единице объема облака по формуле

$$n(d) = \frac{N(d)}{E(d, u) su}, \quad (1)$$

где  $N(d)$  — число частиц с диаметром  $d$ , осевших на фотографируемое место стеклянной пластинки в единицу времени;  $s$  — площадь фотографируемого участка стекла;  $u$  — скорость набегающего на пластинку потока;  $E(d, u)$  — коэффициент захвата, зависящий от конфигурации ловушки\*. Определив  $n(d)$ , можно, помимо спектра распределения капель по размерам, вычислить водность, сечение капель в единице объема (удельное сечение), средние размеры и число частиц в единице объема.

Заметим, что употреблявшаяся нами ловушка позволяла улавливать капли с диаметром больше  $4 \mu$  (т. е. у нее  $d_{\min} \approx 4 \mu$ <sup>(2)</sup>). Ловушка устанавливалась на краю скалы на высоте 3 м над поверхностью земли.

Из проведенных измерений следует отметить следующие результаты.

1. Число капель (с диаметром больше  $4 \mu$ ) менялось в различных типах исследованных облаков (Cu, Cu, Cong, Sc, Cb, St) в широких пределах — от нескольких десятков до 1000 капель в  $1 \text{ м}^3$ .

2. Среднекубический диаметр капель  $D_3$  изменялся в пределах  $6 \div 25 \mu$ .

3. Измеренная водность не превышала  $1,5 \text{ г/м}^3$ . Водность, вычис-

\* Для «поточной ловушки» экспедиции коэффициент захвата был вычислен Л. М. Левиным.

ленная без учета коэффициента захвата, в 1,5—2 раза меньше вычисленной с учетом коэффициента захвата. На это обстоятельство следует обратить внимание при измерении водности приборами типа, разработанного В. А. Зайцевым<sup>(3)</sup>, в которых измеряется объем капели, осевших на препятствие (т. е. водность без учета коэффициента захвата).

4. Существенной особенностью спектров распределения капели облака по размерам, полученных в указанных исследованиях, являлось отсутствие во многих случаях максимума. Точнее говоря, первичная диаграмма спектра  $n(d)$  без учета коэффициента захвата (т. е. вычисленная по формуле (1) в предположении  $E = 1$ ), как

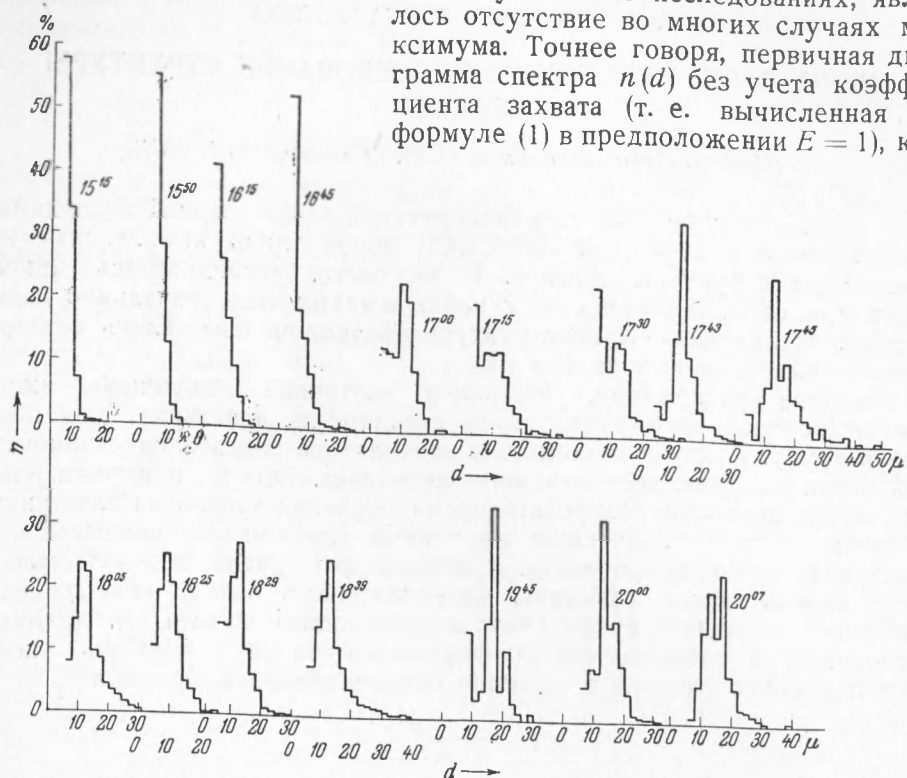


Рис. 1. Спектр распределения облачных капели 14 X 1951

и при всех проводимых прежде различными авторами исследованиях<sup>(1)</sup>, имела максимум в силу существования критического значения параметра  $k - k_{кр}$ <sup>(2)</sup> (параметра подобия траекторий капели) и, следовательно, существования минимального диаметра капели ( $d_{min}$ ), улавливаемых ловушкой. Однако учет коэффициента захвата, т. е. переход от спектра осевших на стекло капели к спектру капели в облаке, приводил часто к тому, что в исследованном интервале размеров капели ( $d > d_{min}$ ) плотность распределения числа капели по размерам монотонно росла с уменьшением диаметра вплоть до  $d_{min}$  (дальнейшее поведение спектра остается невыясненным из-за принципиальной невозможности на данной ловушке улавливать более мелкие капли). Таким образом, в этих случаях вторичная диаграмма спектра (с учетом коэффициента захвата) имела вид гиперболы.

Такого вида гиперболообразные спектры очень часто (а для слоистых облаков во всех исследованных случаях) получались в начальный период образования облаков. В случае слоистых облаков по мере их развития\* происходило укрупнение капели и появление на

\* Следует заметить, что на рис. 1 изменение видов спектров может быть связано не только с развитием облака, но и с его перемещением относительно наблюдаемого пункта.

вторичной диаграмме спектра максимума (см. рис. 1). В случае же кучевых облаков такую закономерность проследить трудно.

5. Было произведено сопоставление измеренного ловушкой удельного сечения капель  $S$  (с учетом  $E$ ) с визуальной видимостью  $L$ . Согласно теории визуальной видимости,  $L$  и  $S$  связаны формулой (4):

$$LS = \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{1}{\varepsilon} \right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент контрастной чувствительности. По данным лабораторных исследований,  $\varepsilon$  в среднем равен 2%, в то время как ряд авторов (5) указывает, что в полевых условиях  $\varepsilon \approx 5\%$ .

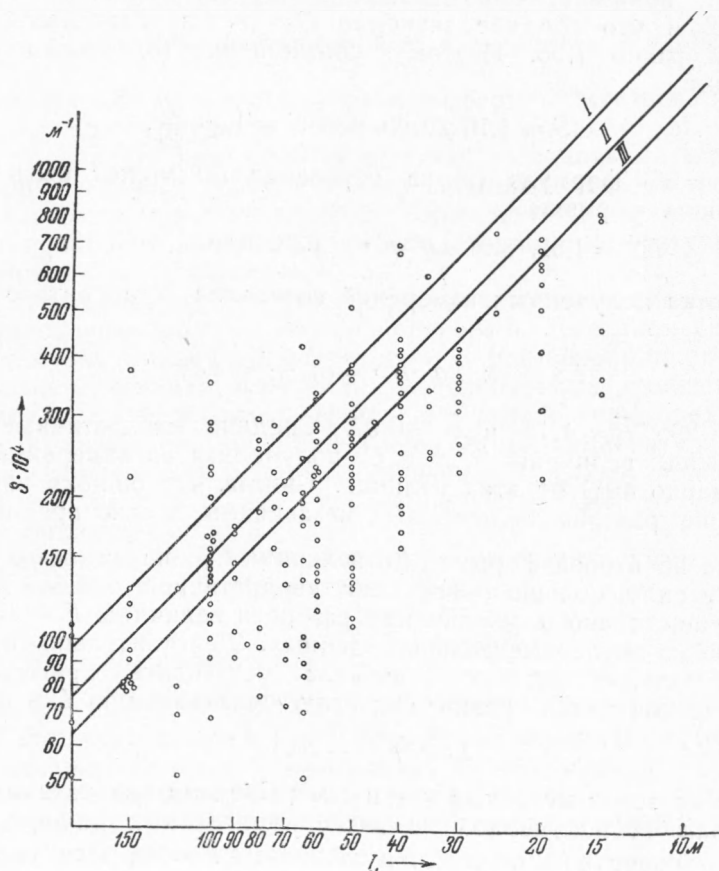


Рис. 2. I — теория,  $\varepsilon = 2\%$ ; II — теория,  $\varepsilon = 5\%$ ; III — эксперимент

На рис. 2 представлены результаты 178 измерений  $L$  и  $S$  в дневное время (до наступления сумерек)\*. В случае, если бы экспериментальные данные точно удовлетворяли уравнению (2), точки на рис. 2 лежали бы на прямой I (при  $\varepsilon = 2\%$ ) или прямой II ( $\varepsilon = 5\%$ ). Вследствие же ошибок в измерениях  $L$  и  $S$  произведение  $LS$  не оставалось постоянным. Его среднее значение  $\overline{LS}$  на 18% меньше теоретического значения  $LS$ , получаемого из уравнения (2) при  $\varepsilon = 5\%$ . Средняя квадратичная ошибка в определении  $LS$  составляет 40% от  $\overline{LS}$ . Нам представляется, что близость экспериментального значения  $\overline{LS}$  к теоретическому косвенным образом подтверждает правильность

\* Из общего числа 181 дневного измерения 3 было отброшено нами как явно ошибочные.

результатов введения коэффициента захвата, так как без его учета значение  $\overline{LS}$  получилось бы на основании экспериментальных данных примерно в 2 раза меньшим.

6. Удельное сечение каплей  $S$  связано с водностью облака  $q$  соотношениями:

$$S = q^{2/3} n^{1/3} \left( \frac{D_2}{D_3} \right)^2 \frac{\pi/4}{(\pi/6)^{2/3}} \quad \text{или} \quad S = \frac{3}{2} \left( \frac{D_2}{D_3} \right)^2 \frac{q}{D_3}, \quad (3)$$

где  $D_3$  и  $D_2$  — среднекубический и среднеквадратичный диаметры каплей. Многочисленные измерения, проведенные в экспедиции в 1951 г., показали, что отношение  $D_3/D_2$  меняется в пределах  $1,01 \div 1,12$  и что среднее значение  $D_3/D_2$  на основании более 500 измерений равно 1,05. Поэтому соотношения (3) можно заменить следующим:

$$S = 1,10 q^{2/3} n^{1/3} \quad \text{или} \quad S = 1,36 \frac{q}{D_3}. \quad (4)$$

При  $\varepsilon = 5\%$  формула (2) на основании (4) может быть записана в следующих формах:

$$LS = 1,52, \quad \text{или} \quad Lq^{2/3} n^{1/3} = 1,38, \quad \text{или} \quad \frac{Lq}{D_3} = 1,12. \quad (5)$$

Обработка полученных измерений позволила установить соотношения\*:

$$LS = A; \quad Lq^{2/3} n^{1/3} = B; \quad \frac{Lq}{D_3} = C^*, \quad (6)$$

где  $\overline{A} = 1,29$ ,  $\overline{B} = 1,18$  и  $\overline{C} = 0,97$ . Средняя квадратичная ошибка в определении величины  $A$ ,  $B$  и  $C$ , полученная из измерений, составляет примерно 40% от этих величин. Считая, что ошибки измерений, вызывающие разброс величины  $B$ , независимы, можно предположить, что замена во второй формуле (6) величины  $\sqrt[3]{n}$  на какое-то среднее значение в силу большого значения квадратичной ошибки  $B$  не вызывает существенного увеличения разброса величины  $F = Lq^{2/3}$ , подсчитанного из экспериментальных данных. Действительно, обработка экспериментальных данных позволила установить приближенную, с теоретической точки зрения, формулу, связывающую  $L$  и  $q$ :

$$Lq^{2/3} = \overline{F} = 20, \quad (7)$$

где  $L$  измеряется в метрах, а  $q$  — в  $\text{г/м}^3$ . Средняя квадратичная ошибка величины  $F$ , полученной из экспериментальных данных, не намного превышает 40% от средней величины  $\overline{F} = 20$ . При увеличении точности измерения  $L$  и  $q$  формула (7) станет менее точной, чем вторая из формул (6). В настоящее время для ориентировочных подсчетов водности по видимости можно пользоваться формулой (7).

Выражаем сердечную благодарность чл.-корр. АН СССР Е. К. Федорову за постановку задачи и постоянное внимание к настоящим исследованиям.

Поступило  
13 XII 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> А. М. Боровиков, Тр. ЦАО, в. 3, 3 (1949). <sup>2</sup> Л. М. Левин, ДАН, **91**, № 6 (1953). <sup>3</sup> В. А. Зайцев, Труды ГГО, в. 13 (75), 71 (1948); в. 19 (81), 122 (1950). <sup>4</sup> К. С. Шифрин, Рассеяние света в мутной среде, М.—Л., 1951, стр. 154—155. <sup>5</sup> Н. Г. Болдырев, Тр. ГГО, в. 19 (81), 14 (1950).

\* Последняя из формул (6) представляет собой известную формулу Траберга.