

Водность облака на различных высотах рассчитывалась исходя из предположения адиабатического подъема влажного насыщенного воздуха внутри облака и сохранения удельного влагосодержания. Отметим, что при такой методике расчета водность конвективного облака выше 2 км над основанием в несколько раз больше экспериментальных значений.

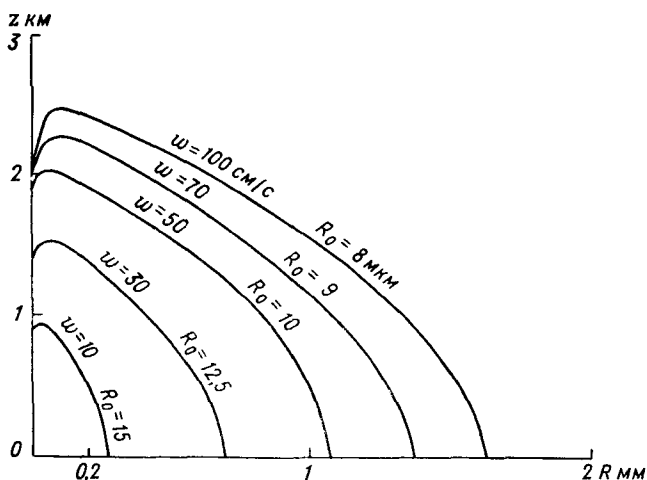


Рис. 18.13. Рост капель в облаках с различными скоростями восходящего движения (в начальный период).

Из рис. 18.13 следует, что размер выпадающих из облака капель очень сильно зависит от скорости восходящего потока. Если при $w = 10$ см/с капли дождя, выпадающие из облака, имеют радиус 0,33 мм, то при скорости w , равной 50 и 100 см/с, радиус капель достигает 1,1 и 1,7 мм. Вершины траекторий капель при скорости w , равной 10, 50 и 100 см/с, находятся на высоте соответственно около 1,0, 2,2 и 2,5 км над основанием облака.

8 Роль твердой фазы в образовании осадков. Формирование града

Наблюдения за развитием облаков и выпадением осадков показывают, что в высоких и умеренных широтах осадки более или менее значительной интенсивности выпадают из облаков, состоящих из капель воды и кристаллов льда, по крайней мере в их верхней части. Это указывает на большую, а возможно, и определяющую роль появления твердой фазы в образовании осадков.

Впервые на этот эффект обратил внимание А. И. Воейков, а затем А. И. Бачинский, Т. Бержерон и В. Финдайзен, которые считали, что появление твердых частиц в облаке является решающим для образования осадков — осадки могут выпадать только из облаков смешанного строения.

Теоретические исследования последних лет в основном подтверждают правильность высказанной гипотезы. Основной эффект, который связан с появлением кристаллов льда в облаке, сводится к тому, что резко увеличивается абсолютное пересыщение $\varepsilon = \rho(s_\infty - s_r)/\rho_{\text{л}}$ (здесь s_∞ и s_r — массовая доля пара в воздухе и у поверхности частицы, $\rho_{\text{л}}$ — плотность льда). Приведем значения ε для крупной ледяной частицы при разных температурах:

T °С	0	-2	-4	-6	-8	-10	-12
$\varepsilon \cdot 10^7$	0	0,86	1,48	1,93	2,18	2,29	2,33
T °С	-14	-16	-18	-20	-30	-40	
$\varepsilon \cdot 10^7$	2,28	2,20	2,06	1,91	1,08	0,51	

Поскольку давление насыщения зависит от радиуса частицы, то существует при каждой температуре критический размер сферических ледяных частиц, при котором они начинают расти за счет перегонки водяного пара с капель воды. Приведем значения критического радиуса $r_{\text{кр}}$ сферических ледяных частиц при разных температурах:

T °С	-1	-5	-10	-15	-20	-30	-40
$r_{\text{кр}} \cdot 10^6$ см	3,90	1,55	0,84	0,59	0,46	0,34	0,28

Если радиус ледяной частицы $r > r_{\text{кр}}$, то частица будет расти, а переохлажденные капли — испаряться. Для расчета радиуса ледяной частицы можно воспользоваться формулой, которая следует из (5.10):

$$r = \sqrt{2De\tau}, \quad (8.1)$$

если начальный радиус мал ($r_0 \approx 0$).

Для ледяных частиц величина ε имеет, согласно приведенным данным, порядок 10^{-7} , в то время как для капель в облаке (со скоростью восходящего потока 10—100 см/с) ε имеет порядок $5 \cdot 10^{-10}$ — $5 \cdot 10^{-9}$. Так как радиус частицы растет пропорционально

$\sqrt{\varepsilon}$, скорость роста мелких ледяных частиц в смешанном облаке может в 10—20 раз превышать скорость роста капель. Вследствие этого резко сокращается время роста облачных элементов в начальной стадии, когда основную роль играет конденсация и сублимация, а скорость коагуляционного роста капель мала.

В отличие от капель, для скорости диффузионного роста ледяных частиц в смешанном облаке скорость восходящего потока не

очень существенна: пересыщение ϵ практически не изменяется при увеличении ω от нуля до 300 см/с.

После того, как радиус ледяных частиц достиг 50—60 мкм, основную роль начинает играть процесс коагуляции (см. рис. 18.12).

Н. С. Шишкин и его сотрудники выполнили расчет роста ледяных частиц, предположив, что замерзание капель происходит в верхней части их траектории, а все капли меньшего размера остаются жидкими и продолжают подниматься вверх. Ледяная частица, форма которой предполагается сферической, при своем падении растет как за счет диффузионной перегонки водяного пара с капель, так и за счет коагуляции со всеми поднимающимися каплями. Коагуляция падающих ледяных частиц (между собой), равно как и капель, маловероятна ($\mathcal{E} = 0$). Для крупных ледяных частиц, значительно превышающих по размеру облачные капли, скорость роста под влиянием коагуляции рассчитывалась по приближенной формуле

$$\Delta R = - \frac{\mathcal{E}\delta^*}{4\rho_l} \frac{v(R)}{v(R) - \omega} \Delta z, \quad (8.2)$$

которую легко получить из формулы (7.11), если предположить, что $R \gg r$ и $\mathcal{E}(R, r) = \text{const}$. Радиус ледяных частиц (градин) в начальный период их выпадения практически линейно растет с увеличением скорости восходящего движения и не зависит от температуры основания облака (при изменении ее от нуля до -12°C).

Время от момента образования облака до момента выпадения первых частиц осадков в случае появления твердой фазы составляет около 40 мин и мало зависит от ω (при изменении ω от 2 до 10 м/с). Размер частиц града при сохранении восходящих токов быстро увеличивается со временем после начала его выпадения. Радиус наиболее крупных частиц града примерно вдвое превышает радиус первых частиц ($R_{\text{макс}} = 4,2$ мм при $\omega = 2$ м/с и $R_{\text{макс}} = 6$ мм при $\omega = 3$ м/с).

9 Влияние других факторов на коагуляцию капель

Кроме рассмотренных в предыдущих параграфах основных механизмов — конденсации и гравитационной коагуляции — можно указать несколько других факторов, под влиянием которых происходит в атмосфере укрупнение твердых и жидких частиц. Дадим краткую характеристику этих дополнительных физических процессов, сопровождающихся коагуляцией частиц.

М. Смолуховский исследовал *броуновскую* и так называемую *градиентную* коагуляцию. Последняя возникает под влиянием гра-