

С. П. Хачатрян

Приближенный расчет характеристик водности конвективных облаков, обусловленных наличием гигантских ядер конденсации в атмосфере

Вопрос о водности в мощнокучевых и кучеводождевых облаках и, особенно, в их центральной части до настоящего времени не получил своего окончательного разрешения. До недавнего времени в литературе указывалось, что водность в конвективных облаках не может превышать 5 г/м^3 . Экспериментальные материалы, полученные в ВГИ АН СССР в 1957—1958 гг. [1], показали, что водность в мощнокучевых облаках может достигать 30 г/м^3 . В последующие годы в зарубежной литературе появились работы, в которых высказывается предположение о наличии в грозовых облаках водности до 30 г/м^3 [7, 8]. Однако, эти, пока еще единичные, данные нуждаются в дальнейшем подтверждении.

Сравнительно недавно в нижних слоях атмосферы были обнаружены гигантские ядра конденсации, имеющие радиус более 10μ . И хотя число таких ядер в атмосфере весьма невелико, в настоящее время существует мнение [1], что основная масса жидкой влаги в облаках обусловлена наличием именно этих ядер конденсации. В настоящей работе сделана попытка получить приближенные данные о возможных величинах характеристик водности конвективных облаков, обусловленных наличием гигантских ядер конденсации в атмосфере.

Вывод расчетных формул

Скорость восходящих потоков в конвективном облаке возрастает с высотой до какой-то максимальной величины W_m на высоте Z_m , а затем уменьшается [2]. Для простоты расчетов можно считать, что скорость восходящих потоков является линейной функцией высоты, т. е.

$$W_z = aZ_m + a_1(Z_m - Z) + b \quad \text{при } Z > Z_m, \quad (1)$$

где W_m — скорость восходящего потока на высоте Z , a и a_1 — градиенты скорости W соответственно до и после уровня Z_m (Z и Z_m отсчитываются от уровня нижней границы облака); b — скорость восходящих потоков у нижней границы облака.

Рассмотрим облако с момента его образования. Допустим, что в начальный момент образования облака ($t=0$) концентрация гигантских ядер в облаке выше уровня Z_m равна нулю, а ниже этого уровня концентрация гигантских ядер не зависит от времени и равна N_1 . Также будем считать, что распределение скорости восходящих потоков по высоте за рассматриваемое время не меняется.

При этих условиях количество гигантских ядер, поступающее в верхнюю часть облака вместе с восходящими потоками, будет зависеть от объема воздуха, приносимого восходящими потоками из области ниже Z_m , и от концентрации гигантских капель N_1 в этой области и очевидно, что за время t через единичную поверхность на уровне Z_m в верхнюю часть облака поднимется число гигантских ядер

$$N_{\Delta Z} = N_1 W_m t; \quad (2)$$

$N_{\Delta Z}$ — есть ничто иное, как количество гигантских ядер* в столбе облачного воздуха с единичным основанием и высотой ΔZ , заключенной между уровнями Z_m и Z_b ; Z_b — высота траектории гигантских капель.

Как известно, скорость падения капель при радиусах $R \leq 45 \mu$ равна $V_R = aR^2$. Если ростом капли радиуса R_0 при подъеме пренебречь, то можно сказать, что капля радиуса $R_0 \leq 45 \mu$ может быть поднята восходящими потоками до высоты, где $W_Z = V_R = aR^2$.

Учитывая это, уравнение (1) можно переписать в виде:

$$aR_0^2 = aZ_m + a_1(Z_m - Z_b) + b.$$

Отсюда найдем Z_b

$$Z_b = \frac{(a + a_1)Z_m + b - aR_0^2}{a_1}.$$

Масса жидкой воды в столбе облачного воздуха единичного сечения и высоты ΔZ равна

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_k \sum N_{\Delta Z i} R_i^3, \quad (3)$$

где ρ_k — плотность капли, $N_{\Delta Z i}$ — число капель радиуса R_i . При постоянном распределении W по высоте, величина M зависит от времени. Эту зависимость в приближенном виде можно получить с помощью следующих рассуждений. Рассмотрим дискретный процесс и предположим, что через каждую единицу времени в область облака выше уровня Z_m , поступает одинаковое число гигантских капель. Как видно из формулы (2), через единичную поверхность на уровне Z_m в область выше Z_m поступает за единицу времени $N = N_1 W_m$ гигантских капель. Число гигантских капель, пришедшее в объем ΔZ за последнюю

* В дальнейшем понятие гигантских ядер будем отождествлять с понятием гигантских капель, так как в облаке на гигантских ядрах конденсации образуются большие облачные капли, так называемые гигантские капли.

единицу времени, будет иметь наименьший, т. е. первоначальный радиус R_0 , а N — число капель, пришедшее за первую единицу времени, вследствие коагуляционного роста будет иметь наибольший радиус R_t . Все остальные группы N числа капель, пришедшие в объем ΔZ за промежуток времени между приходом первой и последней групп, будут иметь размеры между R_0 и R_t в зависимости от времени их нахождения в объеме ΔZ .

Таким образом, сумму капель разных размеров в объеме ΔZ в зависимости от времени можно представить в виде

$$\sum N_{\Delta Z} R_i = N(R_0 + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_t) \quad (4)$$

при $t < t_{кр}$.

Попавшая в область выше W_z облачные капли начинают быстро расти. Однако, капли расти бесконечно не могут. Достигая критических размеров $R_{кр} = 2,5$ мм капли разбрызгиваются на несколько мелких капель. Обозначим время, необходимое для роста капли от размера R_0 до размера $R_{кр} = 2,5$ мм через $t_{кр}$. Тогда формула (4) будет справедлива для случая, когда время существования облака t меньше $t_{кр}$. Если делать предположение, что достигая радиуса 2,5 мм, размеры облачных капель не изменяются, тогда для случая, когда время существования облака больше $t_{кр}$, можем записать:

$$\sum N_{\Delta Z} R_i = N[R_0 + R_1 + R_2 + \dots + R_t + (t - t_{кр}) R_{кр}] \quad (4')$$

при $t > t_{кр}$.

Основное значение для роста облачных частиц радиусом порядка 30–50 м и больше имеет гравитационная коагуляция. Поэтому будем считать, что рост гигантских капель обусловлен только этим процессом, а остальными процессами роста будем пренебрегать.

Уравнение скорости роста капель вследствие гравитационной коагуляции можно представить в виде [1]:

$$\rho_k \frac{dR}{dt} = \frac{qE}{4} (V_R - V_r), \quad (5)$$

где V_R и V_r — скорость падения крупных и мелких капель R и r , q — водность облака, E — коэффициент захвата, равный 0,85. Как известно, скорость падения капель зависит от их размера. Эта зависимость для капель с радиусами $R \leq 45$ м и $45 \leq R \leq 1000$ м выражается формулами соответственно $V_R = \alpha R^2$ и $V_R = \beta R$, где α и β — некоторые коэффициенты. Для простоты расчетов в уравнении (5) величиной V_r можно пренебречь как малой величиной по сравнению с V_R .

Тогда для капель радиуса до 1000 м (5) можно переписать

$$\rho_k \frac{dR}{dt} = \frac{qE}{4} \beta R, \quad (6)$$

Решение уравнения (6) при $t = 0$, $R = R_0$ имеет вид

$$R = R_0 e^{Bt}; \quad (7)$$

B — некоторая постоянная величина, зависящая от q , E и β .

Время $t_{кр}$ находим из уравнения (7), подставляя вместо R_0 и R наличный радиус гигантских капель и радиус, при котором капли разбрызгиваются (т. е. $R_0 = 40 \mu$, а $R = 2,5 \text{ мм}$).

Поскольку водность облака в основном определяется размерами и концентрацией облачных частиц, составляющих крупнокапельную фракцию, то, подставляя (7) в уравнения (4) и (4'), для массы жидкой воды в единичном столбе ΔZ в зависимости от времени получим выражение

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_k N R_0^3 (1 + e^{3B} + e^{3 \cdot 2B} + e^{3 \cdot 3B} + \dots + e^{3iB}) \quad (8)$$

при $t < t_{кр}$

$$M = \frac{4}{3} \pi \rho_k N R_0^3 [1 + e^{3B} + e^{3 \cdot 2B} + \dots + e^{3 \cdot iB} + (t - t_{кр}) e^{3t_{кр}B}] \quad (8')$$

при $t > t_{кр}$.

Зная M , можем определить среднюю водность $\bar{q}$ облака в столбе ΔZ .

Очевидно, что

$$\bar{q} = \frac{M}{Z_b - Z_m}.$$

Представляет большой интерес определение максимально возможных значений водности облака вблизи уровня Z_m . Эту задачу можно решить, если допустить, что выше уровня Z_m водность падает с высотой линейно, достигая минимума у верхней границы облака. В этом случае можно написать

$$q_z = q_m - \sigma Z, \quad (10)$$

где q_z и q_m — водность облака на высотах соответственно Z и Z_m ($Z > Z_m$), σ — градиент водности. Тогда масса воды в столбе облака единичного сечения, имеющего нижнюю и верхнюю границы соответственно Z_m и Z_b , равна:

$$M = \int_{Z_m}^{Z_b} q_z dZ = \int_{Z_m}^{Z_b} (q_m - \sigma Z) dZ. \quad (11)$$

Интегрируя уравнение (11) в указанных пределах, получим

$$M = q_m \Delta Z - \frac{\sigma}{2} \Delta Z^2, \quad (12)$$

где $\Delta Z = Z_b - Z_m$.

Обозначая водность на высоте вершины траектории Z_b через q_{min} , уравнение (10) можно переписать в виде

$$q_{\min} = q_m - \sigma (Z_b - Z_m). \quad (13)$$

Подставляя значение σ из (13) в (12), получим

$$q_m = \frac{2M}{Z_b - Z_m} - q_{\min}. \quad (14)$$

Высота Z_b довольно близко совпадает с высотой верхней границы облака. Многочисленные экспериментальные материалы показывают, что водность облака вблизи верхней границы, а следовательно, и вблизи уровня Z_b имеет величину порядка $0,05 + 0,1 \text{ г/м}^3$.

Имея это ввиду, мы можем переписать (14) в виде:

$$q_m = \frac{2M}{Z_b - Z_m} - 0,05 \text{ г/м}^3. \quad (15)$$

Результаты расчетов

По формулам (8', 9, 15) были проведены расчеты для величин Q , $\bar{q}$ и q_m (количество осадков Q определяется по величине M). Расчеты были проведены для облака, имеющего вертикальную мощность около 5000 м, при различных значениях W_m и для различных моментов времени после его образования. При этом использовались следующие значения коэффициентов:

$$E = 0,85, \quad a = a_1 = (4 + 14) \cdot 10^{-3} \text{ сек}^{-1}, \quad b = 2 \cdot 10^2 \text{ см/сек},$$

$$q = 1 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3, \quad R_0 = 40 \text{ м}, \quad \alpha = 1,26 \cdot 10^6,$$

$$\beta = 7,5 \cdot 10^3.$$

По данным [4] концентрация гигантских ядер конденсации, имеющих радиус более 10 м, равна $2-10/\text{м}^3$. Фурнье д'Альб и Латеви [5] указывают, что гигантские гигроскопические ядра конденсации, имеющие радиус 25 м, обнаруживаются в концентрациях, иногда превышающих $10/\text{м}^3$. По измерениям Юнге [6] ядра конденсации радиуса 15–20 м имеют концентрацию около $10/\text{м}^3$. Однако, не все ядра конденсации, имеющиеся в атмосфере, становятся зародышами облачных капель. Только часть их, в зависимости от своей природы, могут стать ядрами облачных капель. Поэтому для сравнения расчеты были проведены для $N_2 = 0,5$, $N_1 = 1,0$ и $N_1 = 5,0/\text{м}^3$.

Результаты расчетов приведены в таблице 1. Анализ таблицы показывает, что водность облака сильно зависит от времени его существования. Например, при $W_m = 15 \text{ м/сек}$ и $N_1 = 5/\text{м}^3$ через 45 мин после образования облака $\bar{q} = 1,6 \text{ г/м}^3$; $q_m = 3,3 \text{ г/м}^3$, а через 75 мин $\bar{q}$ имеет значение $9,3 \text{ г/м}^3$, а $q_m = 18,5 \text{ г/м}^3$. Из таблицы видно, что количество аккумулярованной воды сильно зависит от величины концентрации гигантских ядер конденсации, которые по своей природе являются активными. При одних и тех же условиях водность облака при $N_1 = 5/\text{м}^3$ в несколько раз превышает водность, полученную при

Величина $\bar{q}$, q_m и Q для различных моментов времени после образования облака и при различных значениях W_m и N_1

Таблица 1

Максимальная скорость ветра W_m м/сек	Средняя водность облака выше уровня Z_m $\bar{q}$ г/м ³				Максимальная водность облака вблизи уровня Z_m q_m г/м ³				Количество осадков на площадь, равную плоскости горизонтального сечения облака на уровне Z_m Q мм			
	время в минутах				время в минутах				время в минутах			
	30	45	60	75	30	45	60	75	30	45	60	75
$N_1 = 0,5/\text{м}^3$												
10	0,0015	0,10	—	—	0,003	0,19	—	—	<0,1	0,20	—	—
15	0,002	0,16	0,55	0,93	0,004	0,33	1,09	1,85	<0,1	0,37	1,20	2,00
20	0,003	0,20	0,64	1,10	0,016	0,39	1,27	2,19	<0,1	0,40	1,40	2,40
25	0,004	0,25	0,80	1,37	0,018	0,49	1,60	2,70	<0,1	0,50	1,80	3,00
30	0,006	0,32	1,14	1,70	0,120	0,60	2,27	3,40	<0,1	0,70	2,50	3,70
$N_1 = 1,0/\text{м}^3$												
10	0,003	0,20	—	—	0,06	0,38	—	—	<0,1	0,40	—	—
15	0,004	0,32	1,10	1,90	0,08	0,64	2,00	3,70	<0,1	0,74	2,40	4,00
20	0,006	0,40	1,30	2,20	0,12	0,78	2,50	4,30	<0,1	1,00	3,60	6,00
25	0,108	0,50	1,60	2,70	0,16	0,98	3,10	5,30	<0,1	1,00	3,60	6,00
30	0,012	1,13	2,30	3,40	0,24	1,28	4,50	6,70	<0,1	1,40	5,00	7,40
$N_1 = 5/\text{м}^3$												
10	0,015	1,00	—	—	0,30	1,90	—	—	0,1	2,00	—	—
15	0,020	1,60	5,50	9,30	0,40	3,30	10,50	18,50	0,1	3,70	12,00	20,00
20	0,030	2,00	6,40	11,00	0,60	3,90	12,70	21,90	0,1	4,00	14,00	24,00
25	0,040	2,50	8,00	13,70	0,80	4,90	16,00	27,00	0,1	5,00	18,00	30,00
30	0,060	3,20	11,40	17,00	1,20	6,00	22,70	34,00	0,15	7,00	25,00	37,00

расчетах с $N_1 = 1,0/\text{м}^3$. Поэтому для более точного определения характеристик водности кучевых облаков необходимо проводить дальнейшее исследование как концентрации, так и природы гигантских ядер конденсации. Результаты расчетов наводят на мысль, что в отдельных случаях, встречающихся в природе сравнительно редко, водность облака может быть примерно на порядок больше тех значений, которые до сих пор были измерены экспериментально.

Так например, по результатам расчета, при $N_1 = 5/\text{м}^3$ и $W_m = 30$ м/сек через 75 минут после образования облака максимальная водность в нем достигает значения ~ 30 г/м³, что же касается количества осадков, то по результатам расчета на площадь, равную плоскости горизонтального сечения облака на уровне Z_m , могут выпасть осадки от десятых долей мм до 37 мм в зависимости от N_1 , W_m и времени образования осадков после возникновения облака.

Как было показано исследованиями [1, 3], основная масса влаги облака аккумулируется в верхней половине облака, выше уровня Z_m . Поэтому можно предполагать, что полученные данные дают предст

ление о возможных максимальных величинах характеристик водности облака в целом.

Выражаю свою благодарность профессору Г. К. Сулаквелидзе, поставившему задачу и оказавшему помощь в ее решении.

Институт водных проблем
АН Армянской ССР

Поступила 18 VI 1963

Ս. Փ. Խաչատրյան

ՄՅՆՈՒՈՐՈՏԻՄ ԿՈՆԴԵՆՍԱՑՄԱՆ ՀԱՎԱ ՄԻՋՈՒԿՆԵՐԻ ԱՌԿԱՅՈՒԹՅԱՄԲ ՊԱՅՄԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ԿՈՒՅՏԱՎՈՐ ԱՄՊԵՐԻ ՋՐԱՅՆՈՒԹՅԱՆ ՏԱՐԲԵՐ ԽԱՐԱԿԵՐԻՍՏԻՎԱՆԵՐԻ ՄՈՏԱՎՈՐ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում ստացված են կոնվեկտիվ ամպերի ջրայնության տարրեր խարակտերիստիկաների հաշվարկման մոտավոր բանաձևեր:

Այդ բանաձևերի հիման վրա կատարված են հաշվարկներ մթնոլորտում կոնդենսացիայի հսկա միջուկների տարրեր կոնցենտրացիաների համար: Բերված են միջին և մաքսիմալ ջրայնության հաշվումների արդյունքներն ու հնարավոր տեղումների քանակը արդյիսի ամպերից:

Հոդվածում բերված տվյալների և ուրիշ հետազոտողների տվյալների համեմատությունից արվում է եզրակացություն, որ ստացված արդյունքները հնարավորություն են տալիս գաղափար կազմելու ամրոզչությանը վերցրած ամպի ջրայնության խարակտերիստիկաների հնարավոր մեծության մասին:

ЛИТЕРАТУРА

1. Бартишвили Г. С., Библашвили Н. Ш., Зайцева А. М., Лапчева В. Ф., Орджоникидзе А. А., Сулаквелидзе Г. К. Рост капель и градин в мощнокучевом облаке с учетом изменения скорости вертикальных потоков по высоте и физические осадочные воздействия на градовые процессы. Труды Эльбрусской экспедиции (ВГН АН СССР), т. 2, 1961.
2. Библашвили Н. Ш. Некоторые вопросы структуры конвективных потоков в кучевых и мощнокучевых облаках. Труды Эльбрусской экспедиции, том 2, 1961.
3. Библашвили Н. Ш., Лапчева В. Ф., Орджоникидзе А. А., Сулаквелидзе Г. К. Известия АН СССР, серия геофизич., № 4, 1960.
4. Борозинков А. М. Физика облаков. Гимиз, 1961.
5. Fournier d'Albe E. M. and Lateev A. M. A Preliminary Note on the Large Hydroscopic Particles suspended in the Atmosphere. Bul. de L'Obs. Puy de Dome, I, 1953.
6. Junge C. Gesetzmässigkeiten in der Grössenverteilung atmosphärischer Aerosole über dem kontinent. Ber. Dtsch. Wetterdienst. U. S. Zone, 35, 1952.
7. Marshall J. S. Inter-relation of the Fall Speed of Rain and the Updraft Rates in Hail Formation. Nubila, 4, 1961.
8. Hirschfeld Walter, Douglas R. H. A Theory of Hail Growth Based on Radar and Surface Studies of Alberta Storms, Proc. 9th Weather Radar Conf. Kansas City, Mo. 1961, S. 1, s. a.