

26
778
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Труды, выпуск 14

ОБЛАКА, ОСАДКИ И ВОПРОСЫ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

175263

БИБЛИОТЕКА
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

ЛЕНИНГРАД
1963

В сборнике освещаются актуальные вопросы физики облаков, осадков и атмосферной турбулентности; приводятся новые данные о пространственной структуре полей облачности, внутриоблачных физических процессах и количественных характеристиках турбулентного обмена.

Сборник рассчитан на научных работников и специалистов, работающих в области метеорологии а также на синоптиков-практиков.

Ответственные редакторы:

доцент, канд. физ.-мат. наук *С. В. Солюнин,*

доцент, канд. географ. наук *Г. Г. Тараканов*

В. С. АНТОНОВ

ОБ УЧЕТЕ ВНУТРИОБЛАЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ДИАГНОЗЕ И ПРОГНОЗЕ ОБЛОЖНЫХ ОСАДКОВ

В настоящее время теоретические схемы фазовых превращений воды в атмосфере, описывающие образование осадков, представляют собой решение задачи о росте капли в облаке [1-5 и др.]. При практическом использовании этих схем в целях диагноза и прогноза осадков следует различать два основных случая: чисто водяные облака, из которых выпадают только жидкие осадки, и смешанные облака, состоящие из капелек воды и кристаллов льда. Из смешанных облаков могут выпадать как жидкие, так и твердые осадки.

Многочисленные наблюдения указывают, что в средних широтах в преобладающем большинстве заметные обложные осадки, исключая моросящие, выпадают из смешанных облаков.

В исследованиях [2,6,7] дается повторяемость осадков, выпадающих из слоистых облаков при различных значениях температуры на верхней границе и различных типах микроструктуры облака. В частности, Е.Г.Зак [7], обработав обширный материал самолетного зондирования атмосферы над территорией СССР, показала, что чисто водяные слоистые облака дают обложные осадки у поверхности земли только в 6% случаев, кристаллические - в 53%, а смешанные - в 83%.

Таким образом, в средних широтах смешанные облака являются коллоидально неустойчивыми и служат источником наиболее интенсивных осадков.

Подобные выводы были сделаны Пепплером [6], Мейсоном и Хауртом [2].

Рассмотрим прежде всего некоторые вопросы физики образования осадков в этих облаках.

1. Смешанные облака

Общезвестно, что существование в переохлажденном облаке капель воды совместно с кристаллами льда вызывает интенсивный рост последних, что даже при незначительной толщине облака и малых значениях влажности приводит к выпадению осадков [2,4,8,10 и др.].

Используя теоретические выводы и расчеты работ [4,8] о том, что мощность облака и температура на его верхней границе являют-

ся важными параметрами, определяющими процесс осадкообразования, в работе [11] был построен график связи между мощностью облака, температурой на его верхней границе и осадками.

Из этого графика было установлено, что при температурах на верхней границе слоистого облака от -16°C и ниже минимальная мощность облака, при которой наблюдаются осадки, 400 м. В области возрастающих от -16° значений температур идет прогрессирующее увеличение значений мощности облаков, причем наибольшее нарастание мощности идет от температуры $> -10^{\circ}$.

Из работ [1,2,6,12,13 и др.] известно, что повторяемость чисто водяных переохлажденных облаков с понижением температуры убывает с большой скоростью. Уже при температуре -8° она становится менее 50%, а при -20° - всего 10%. Таким образом, температура на верхней границе облака в какой-то степени может характеризовать существование твердой фазы в облаке, но такая характеристика недостаточно надежна. Из нее не следует, при каких условиях при данной температуре в переохлажденном облаке произойдет образование такого количества кристаллов, которое могло бы сказаться на коллоидальной устойчивости облака.

Поэтому зависимость между мощностью облака, температурой на его верхней границе и осадками может характеризовать процесс осадкообразования только в первом приближении, особенно в области температур, при которых равновероятно существование как жидкой, так и твердой фазы.

В работах Л.Г. Качурина [8,14,16] разработана теория кристаллизации переохлажденных водяных аэрозолей.

Для исследований нашего плана наибольший интерес представляет уравнение скорости кристаллизации облаков, полученное в [17]:

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0} = 1,63\pi\psi(T) \left[\frac{g\chi}{2\rho_g} W \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где $\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0}$ - относительное число капель, замерзающих в единицу времени (скорость замерзания); $\psi(T)$ - вероятность образования гетерофазных ледяных зародышей в единице объема переохлажденной воды в единицу времени при температуре T ; χ - коэффициент вязкости воздуха; g - ускорение силы тяжести; ρ_g - плотность воздуха; W - вертикальная скорость ветра.

Уравнение (1) устанавливает зависимость между скоростью замерзания облака, его температурой и вертикальными токами. Справедливо оно только для неконвективных развивающихся облаков типа $As-Ns-Sc$, в которых наблюдаются восходящие токи ~ 1 см/сек. Обычно такие облака в преобладающем большинстве своем отмечаются в циклонических областях.

В работе [8] было показано, что замерзающая капля в развивающемся переохлажденном облаке при вертикальных скоростях ветра

менее 10 см/сек. после своего замерзания может подняться на очень небольшую высоту, от нескольких сантиметров до нескольких метров, так как за счет сублимации водяного пара будет быстро укрупняться и падать вниз. Одновременно резко возрастает и роль коагуляции из-за увеличения разности скоростей падения капли и кристалла одного и того же веса и увеличения вероятности захвата растущей снежинкой соседних капель.

Таким образом, чем больше скорость кристаллизации, т.е. чем большее количество капель замерзает в единицу времени, тем при прочих равных условиях будут интенсивнее осадки. Если рассматривать только факт выпадения осадков, не рассчитывая их интенсивности, то необходимо установить такое минимальное число замерзших капель, которое было бы достаточным для образования заметных осадков:

$$\frac{dn}{dt} = \text{const.} \quad (2)$$

Температура, при которой осуществляется условие (2), названа Л.Г. Качуриным температурой интенсивной кристаллизации.

В работе [8] приводится график для расчета температуры интенсивной кристаллизации в облаках в зависимости от вертикальной скорости ветра при $\frac{dn}{dt} = 10^{-4} \frac{1}{\text{сек.}} = 10^{-2} \text{ \%/сек.}$ Насколько справедлив выбор именно такой минимальной скорости замерзания, могла определить только экспериментальная проверка.

На большом материале самолетного зондирования атмосферы было проведено исследование по выявлению зависимости между температурой интенсивной кристаллизации и вертикальными токами в слоистых переохлажденных облаках [17].

В результате обнаружилось, что между вертикальной скоростью в облаке и температурой интенсивной кристаллизации действительно имеется связь такого типа, как подсказывала теория [8].

Эмпирическая кривая [17] указанной связи при наличии восходящих токов от 0,1 до 5 см/сек. (от -5 до -250 мб/12 час.) может быть аппроксимирована уравнением

$$\lg \frac{dn}{dt} = 0,4343 \left[19,6 - \frac{1540}{T} - \frac{2,4T}{(273-T)^2} \right] - 8,4921 + \frac{3}{2} \lg W, \quad (3)$$

где $\frac{dn}{dt} = \text{const} = 2,3 \cdot 10^{-5} 1/\text{сек.}$, которое совпадает с уравнением (1) и отличается от последнего лишь численными коэффициентами.

Однако при получении эмпирической кривой зависимости температуры интенсивной кристаллизации от вертикальных токов учет мощности облаков производился лишь частично. Принимались во внимание только такие облака, мощность которых была 400 м и более, что вытекало из установленной ранее [11] критической мощности при осадках из смешанных слоистых облаков.

Такой учет мощности предполагал, что все интенсивные осадки выпадают только из смешанных облаков, что не совсем верно.

В настоящее время имеется немало примеров интенсивных осадков, выпадающих из чисто водяных слоистых облаков [2,5,7 и др.]. Несмотря на то, что процентное количество случаев выпадения осадков из таких облаков небольшое, все же и это заставляет признать принципиальную возможность нарушения коллоидальной устойчивости в водяных облаках. Теоретическое обоснование такой возможности приводится в работе [4]. К сожалению, при построении графика связи между осадками, температурой на верхней границе облака и вертикальными токами в нем [17] мы не имели возможности выделить осадки, которые выпадают из капельных облаков, так как методика построения графика не предполагала разделение осадков на выпадающие из чисто водяных или смешанных облаков, а наблюдения при самолетном зондировании атмосферы в ряде случаев непосредственно не характеризуют фазового состояния облака.

Очевидно, что исследование по выявлению связи между осадками, скоростью замерзания на верхней границе развивающегося переохлажденного слоистого облака и мощностью его позволит выявить те критические параметры облака, при которых оно переходит в дождевое.

Попутно выявится и тип микроструктуры облака, дающего осадки, так как скорость замерзания, согласно [8,17] характеризует фазовое состояние облака, а мощность отображает интегральное влияние суммы факторов, участвующих в конденсационно-коагуляционном процессе роста падающей в облаке капли. Из имеющихся в нашем распоряжении материалов более 4300 подъемов самолетов-зондировщиков атмосферы за 1959, 1960 и частично 1961 гг. Москвы, Ленинграда, Киева, Минска, Минеральных Вод, Одессы, Риги, Куйбышева, Львова, Свердловска, Волгограда, Ростова-на-Дону были взяты случаи только утреннего зондирования, когда наблюдалась облачность и восходящие вертикальные токи на уровне или близко к уровню верхней границы облаков.^{1/}

Всего таких случаев оказалось 787. Для каждого использованного нами самолетного зондирования атмосферы по данным о температуре и вертикальных токах на верхней границе облака вычислялся логарифм величины скорости замерзания ($\lg \frac{dn}{dt}$) и рассчитывалась мощность облака (ΔH). Вычисление $\lg \frac{dn}{dt}$ производилось по специально построенному для этой цели графику (рис.1), который рассчитан на основании уравнения (3).

^{1/} Были использованы вертикальные токи, которые ежедневно рассчитываются в Центральном институте прогнозов по формулам, опубликованным в [18].

Утреннее зондирование использовалось для того, чтобы избежать влияния дневного прогрева приземных слоев воздуха на облака.

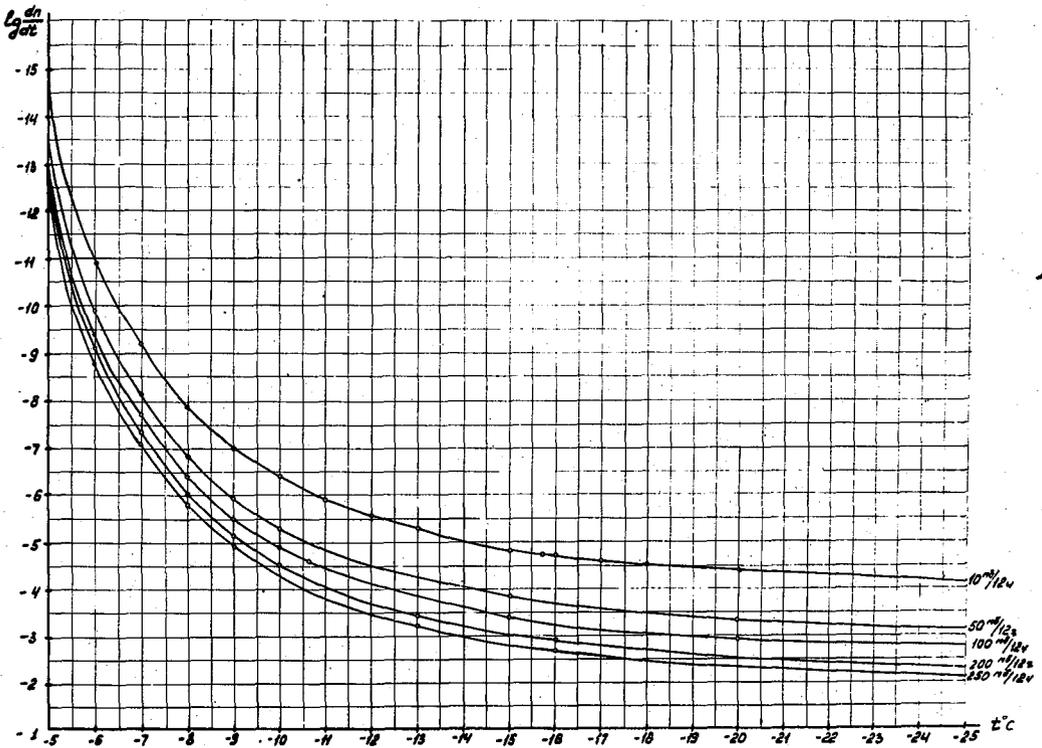


Рис.1. ГРАФИК ДЛЯ РАСЧЕТА СКОРОСТИ ЗАМЕРЗАНИЯ
ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО СЛОИСТОГО ОБЛАКА В
ФУНКЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТОКОВ.

Затем результаты расчетов наносились на другой график, по оси абсцисс которого откладывалась величина $lg \frac{dn}{dt}$, а по оси ординат - ΔH .

Случаи зондирования, при которых наблюдались осадки (исключая морозящие), на графике отмечались значком "+", а без осадков - "0".

После того как были нанесены все данные, плавной кривой были разделены области "осадков" и "без осадков".

Полученный таким образом график, устанавливающий зависимость между осадками, температурой и вертикальными токами на верхней границе переохлажденного развивающегося слоистого облака и его мощностью, представлен на рис.2.

Рассмотрим подробно этот график. Видно, что существует очень четкое разделение областей "с осадками" и "без осадков", особенно при больших значениях $lg \frac{dn}{dt}$. Такое положение позволяет провести кривую связи с большой обеспеченностью и сделать выводы в достаточной степени надежными.

При больших значениях $lg \frac{dn}{dt}$ мощность облаков, из которых выпадают осадки, равна 400 м. и остается постоянной вплоть до

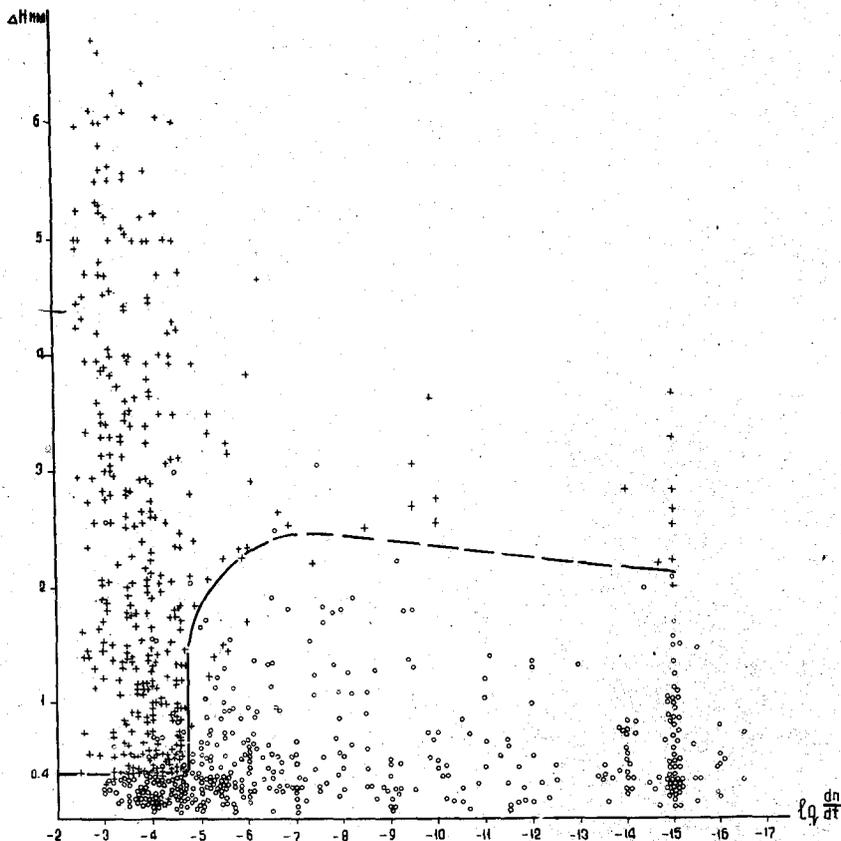


Рис.2. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ОСАДКАМИ, МОЩНОСТЬЮ ОБЛАКА И СКОРОСТЬЮ ЗАМЕРЗАНИЯ НА ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО СЛОИСТОГО ОБЛАКА.

значений $\lg \frac{dn}{dt} = -4,65$, что соответствует $\frac{dn}{dt} = 2,3 \cdot 10^{-5} 1/\text{сек.}$

Эта величина скорости замерзания соответствует установленной в работе [17] минимальной скорости замерзания облака, которая достаточна для образования и выпадения заметных осадков. В области значений $\lg \frac{dn}{dt}$ несколько меньших $-4,65$ минимальная мощность облака, при которой выпадают осадки, скачкообразно возрастает до 1800 м. Затем при дальнейшем уменьшении $\lg \frac{dn}{dt}$ идет довольно быстрое, но не скачкообразное нарастание мощности "дождящих" облаков, и при $\lg \frac{dn}{dt} = -6,2$ она достигает наибольшей величины и равняется 2600 м. Далее, с уменьшением скорости замерзания на верхней границе облака, из которого выпадают заметные осадки,

идет медленное уменьшение мощности облака.

Следует указать, что этот участок кривой недостаточно обеспечен количеством точек.

Анализируя ход кривой указанной связи, можно сделать следующие выводы.

При скорости замерзания на верхней границе развивающегося переохлажденного слоистого облака, равной и большей $2,3 \cdot 10^{-5}$ 1/сек., существует постоянная критическая мощность облака, из которого могут выпадать осадки, которая равна 400 м. При $\frac{dn}{dt} < 2,3 \cdot 10^{-5}$ 1/сек. мощность облака, дающего осадки, скачкообразно возрастает, что указывает на качественно новый характер конденсационно-коагуляционного роста падающей в облаке капли.

Естественно считать поэтому скорость замерзания на верхней границе облака, равную $2,3 \cdot 10^{-5}$ 1/сек., критической скоростью замерзания, при которой происходят существенные изменения в фазовом состоянии облака.

Представляет особый интерес рассмотреть участок кривой при значениях $\lg \frac{dn}{dt}$ от -4,65 до -6,2, где увеличение необходимой мощности для "дождящего" облака происходит быстро, но не скачкообразно. Здесь, по всей вероятности, уменьшение числа замерзающих в единицу времени капель на верхней границе облака и, таким образом, числа "дождевых" капель восполняется их конечным размером, которого они достигают, выпадая из облака. Как визуально, так и инструментально такие осадки воспринимаются как существенные. Таким образом, облака при мощности более 1800 м могут переходить в другое фазовое состояние при скорости замерзания на верхней границе $\sim 10^{-6}$ 1/сек., что соответствует диапазону температур от -8 до -11° при колебаниях вертикальной скорости ветра соответственно от 5 до 0,1 см/сек. Сдвиг температуры интенсивной кристаллизации в сторону более высоких температур в облаках, имеющих мощность около 2000 м, не противоречит теории замерзания переохлажденных водных аэрозолей.

Согласно [16], расчет скорости кристаллизации переохлажденных облаков может быть проведен с помощью уравнения

$$\frac{dn}{dt} = \varphi(\tau) \int \eta(z) \frac{4}{3} \pi z^3 \exp \left[-\frac{4}{3} \pi z^3 \int \varphi(\tau) dt \right] dz, \quad (4)$$

где t - время, $\eta(z)$ - относительное число капель с радиусом z , остальные обозначения известны.

Если выполнить интегрирование (4) для $t = 0$, используя функцию распределения капель по размерам $\eta(z)$ в виде [4]

$$\eta(z) = \frac{z^2 \exp \left[\frac{2}{K} \left(\frac{z}{z_m} \right)^K \right]}{\frac{z_m^3}{K} \left(\frac{K}{2} \right)^{\frac{3}{K}} \Gamma \left(\frac{3}{K} \right)}, \quad (5)$$

где Z_m - мода (радиус наиболее часто встречающихся капель) функции $\eta(z)$, Γ - полная гамма-функция, K - коэффициент ($1 \leq K \leq 4$), то получим

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0} = \frac{4}{3} \pi \psi(\tau) P(K) Z_m^3, \quad (6)$$

$$\text{где } P(K) = \left(\frac{K}{2}\right)^{\frac{3}{K}} \frac{\Gamma\left(\frac{6}{K}\right)}{\Gamma\left(\frac{3}{K}\right)}.$$

Из (6) видно, что чем больше радиус наиболее часто встречающихся капель, тем больше скорость замерзания и тем при более высокой температуре достигается определенная скорость кристаллизации облака.

Вероятнее всего предположить поэтому, что при большой мощности облаков можно получить осадки при меньшей скорости кристаллизации на верхней границе облака и, как следует из теории [16] и рис. 1, при более высокой температуре. На рассматриваемом графике это довольно четко выражено участком кривой связи в области $\lg \frac{dn}{dt}$ от -4,65 до -6,2 и ΔH от 1800 до 2600 м.

Наконец, рассмотрим участок кривой связи между осадками, температурой и вертикальной скоростью на верхней границе облака и мощностью его при $\lg \frac{dn}{dt} < -6,2$.

Уменьшение мощности, необходимой для "дождящего" облака, с уменьшением скорости кристаллизации на его верхней границе может показаться на первый взгляд парадоксальным, так как все предыдущие рассуждения доказывали обратное. Однако такой ход кривой связи становится объяснимым, если предположить, что скорость кристаллизации, меньшая 10^{-6} 1/сек., уже не влияет на изменение фазового состояния облака. В этом случае мы имеем дело с чисто водяными облаками, в которых характер процессов конденсационно-коагуляционного роста падающей капли отличается от подобных процессов в смешанных облаках. Ниже это будет показано.

Заканчивая анализ графика, отметим его прогностическое значение. Зная мощность облака, температуру на его верхней границе и вертикальную скорость, можно рассчитать возможность выпадения осадков из слоистых облаков, не прибегая к громоздким и довольно сложным расчетам по формулам, описывающим скорость роста капель и скорость замерзания облака.

Большой практический интерес представляет выявление зависимости между фактом выпадения осадков у земли и высотой расположения нижней границы облака. В теоретическом плане этот вопрос подробно рассматривался в работах [1, 2, 8 и др.]. Из указанных работ следовало, что путь, который проходит капля под облаком до своего полного испарения, зависит от начального радиуса капли и дефицита влажности под облаком.

Так как мощность облака в какой-то степени может характеризовать размер выпадающих из него капель, а высота нижней гра-

ницы - путь падения капли и среднюю относительную влажность слоя воздуха под облаком, то естественно ожидать связь между осадками у земли, мощностью и высотой нижней границы облака.

Мейсон и Хаурт [20], а позднее Синглетон [19] построили графики зависимости между выпадением осадков у земли в соотношении мощности и высоты нижней границы облака. Из полученных ими графиков указанной зависимости, построенных по данным самолетного зондирования атмосферы, видно, что действительно существует связь между выпадением осадков у земли, мощностью и высотой нижней границы облака. Однако эти графики имеют, на наш взгляд, некоторые недостатки.

Во-первых, они не обеспечены достаточным количеством данных, особенно при значительной высоте нижней кромки облака, и, во-вторых, не произведено разделение облаков, дающих осадки, на смешанные и чисто водяные, что сделать было необходимо.

Из теории образования осадков следует, что для чисто водяных облаков зависимость выпадения осадков у земли от соотношения мощности и нижней границы облака должна быть сильной, для смешанных облаков - слабой, что объясняется большими по сравнению с каплями размерами снежинок, наличием отрицательной температуры под облаком, повышенной относительной влажностью воздуха в пограничном слое атмосферы в холодное полугодие и другими причинами.

Располагая значительно большим числом данных самолетного зондирования атмосферы, чем авторы [20, 19], мы получили возможность исследовать зависимость между выпадением осадков у земли, мощностью и высотой нижней границы облака, разделив осадки на выпадающие из смешанных и чисто водяных облаков. В основу деления облаков на чисто водяные и смешанные была положена скорость замерзания на верхней границе облака.

Указанная зависимость для чисто водяных облаков будет обсуждена ниже, при рассмотрении физики образования осадков в капельных облаках. Здесь же мы изложим результаты исследования для смешанных облаков.

Прежде всего было произведено определение повторяемости осадков у земли при различных градациях мощности и высоты нижней границы смешанного облака.

Из данных самолетного зондирования атмосферы на Европейской территории СССР за 1959, 1960 гг. отбирались случаи выпадения осадков из смешанных облаков, как достигающих, так и не достигающих земной поверхности. Таких случаев оказалось около 400.

Затем по градациям подсчитывалась повторяемость выпадения осадков у земли, как процентное отношение осадков, достигающих земной поверхности, ко всем выпадающим из облаков осадкам при данной градации мощности и высоты нижней границы облака.

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Высота нижней границы облака, дающего осадки, $H_{н.г.}$ м	Мощность облака, дающего осадки, ΔH м						> 4400
	0-200	200-400	400-800	800-1200	1200-2000	2000-4400	
0-1300	0 %	72 %	95 %	96 %	97 %	99 %	100 %
1300-2200	0	0	76	88	91	91	100
> 2200	0	0	20	25	25	25	нет данных

Видно, что при высоте нижней границы облаков от 0 до 1300 м почти все выпадающие осадки достигают земной поверхности, если толщина смешанного облака 400 м и более. При мощности облаков 800 м и более осадки в преобладающем большинстве случаев достигают земли уже при высоте нижней границы облака около 2200 м.

Существенно важно отметить, что высокие облака, нижнее основание которых располагается на высотах более 2200 м, очень редко, в 20-25% случаев, приносят осадки, достигающие земной поверхности.

Объясняется это, по-видимому, тем, что высокие облака большей частью бывают смешанными при небольшой своей толщине (400-800 м) и при положительных температурах в приземном 400-метровом слое воздуха. Это приводит к резкому возрастанию скорости испарения тающих снежинок, и выпадающие из данных облаков осадки до земли не доходят.

При отрицательных температурах в приземном слое воздуха слоистые облака, которые располагаются на высотах более 2200 м, при мощности 400 м и более чаще всего бывают кристаллическими. Известно, что в чисто ледяных облаках скорость роста кристаллов значительно меньше, чем в смешанных, количество их в единице объема облака мало.

Таким образом, выпадающие из кристаллических облаков осадки, как правило, бывают разреженными, а их элементы имеют малую массу и небольшую скорость падения. Они легко уносятся горизонтальным потоком воздуха на большие расстояния, образуя полосы падения - *visga* [1,2]. Что же касается повторяемости осадков при мощности облаков от 200 до 400 м, то к этим данным надо подойти особо. Дело в том, что при мощности смешанного облака меньше 400 м осадки выпадают только в 4% случаев, из которых 72% достигают земли, в то время как при мощности слоистого облака от 400 до 800 м вероятность выпадения осадков составляет 91%.

Из этого следует, что при расчетах осадков тонкие облака ($\Delta H < 400$ м) следует считать облаками, не дающими осадков, даже если они и являются смешанными.

Наблюдения показывают, что выпадающие из таких облаков осадки

представляют собой небольшие, отдельно летящие снежинки.

В литературе приводится схема образования осадков в *St, Sc*, когда облако "заражается" ледяными элементами извне, например, при выпадении зародышей снежинок и кристаллов из вышележащего слоя *As* [9,10,21,22 и др.]

Как показал анализ материала самолетного зондирования атмосферы, такая схема для конкретных расчетов непригодна, так как не во всех случаях переохлажденные облака типа *St, Sc*, даже если они и "заражаются" ледяными элементами извне, дают осадки.

В этом случае мы имеем полную аналогию с опытами по искусственному воздействию на переохлажденные устойчивые слоистые облака.

В справке [23] указывается, что искусственные осадки могут быть стимулированы в тех случаях, когда облако имеет толщину не менее 300 м и температуру у его верхней границы не выше -4° .

Опыты по искусственному воздействию на переохлажденные слоистые облака и наши данные показали, что положительный результат воздействия или, для наших случаев, выпадение осадков из таких облаков может быть только при определенном сочетании мощности и средней температуры переохлажденного слоистого облака.

Приведем несколько примеров.

К а з а н ь. 27/X 1959 г. 3,3 ч.

Погода у земли 10/10 *Sc*, без осадков. $t = 2,7^{\circ}$, $u = 82\%$.

Зондаж: 1-й слой облаков - 10 б., *Sc*, нижняя граница около 640 м, верхняя - 1400 м, температура на нижней границе $+0,4^{\circ}$; на верхней $-4,4^{\circ}$; 2-й слой облаков - 10 б., *As*, нижняя граница 2470 м, $t = -11,7^{\circ}$, верхняя граница 2870 м, $t = -14,1^{\circ}$.

Из *As* выпадает снег. Снег прекращается на высоте 630 м.

В этом примере слой облаков, в который попадают ледяные элементы из вышележащего слоя *As*, имеет мощность $\Delta H = 800$ м и среднюю температуру $\bar{t} = -2^{\circ}$. При таком сочетании указанных параметров облака рост элементов осадков в нем незначительный, т.е. выпадающие снежинки имеют небольшой размер и быстро испаряются под облаком, проходя незначительный слой, хотя облако, "заразившись" ледяными элементами извне, стало смешанным и коллоидально неустойчивым.

М и н с к. 8/IV 1959 г. 4,7 ч.

Погода у земли 10/10 *Ns*, умеренный дождь, $t = +5,9^{\circ}$, $u = 92\%$.

Зондаж: 1-й слой облаков - 10 б., *Ns*, нижняя граница 690 м, температура на нижней границе $t = +2,1^{\circ}$, верхняя граница 1280 м, $t = +1,6^{\circ}$; 2-й слой - 10 б., *Sc*, нижняя граница 1620 м, $t = -0,7^{\circ}$, верхняя граница 2430 м, $t = -3,8^{\circ}$; 3-й слой - 10 б., *As*, нижняя граница 3060 м, $t = -7,2^{\circ}$, верхняя граница 5630 м, $t = -26,6^{\circ}$.

Из *As* выпадает снег, достигая слоя *Sc*. Параметры этого облака $\Delta H = 810$ м, $\bar{t} = -2,3^{\circ}$. В этом случае укрупнение снежинок в *Sc* более значительное. Выпадая из облака, они проходят безоб-

лачную прослойку в 400 м еще настолько крупными, что обуславливают у поверхности земли умеренные осадки. Этому несколько способствует и нижележащий слой теплых капельных облаков. Однако влияние этого слоя, как будет показано ниже при рассмотрении вопроса образования осадков в теплых облаках, не является определяющим. Можно утверждать, что и без наличия этого сравнительно тонкого ($H = 590 \text{ м}$) облачного слоя теплых капельных облаков у земли наблюдались бы существенные осадки.

Другие примеры представлены нами в табл.2.

Отметим, что при отборе подобных случаев был использован материал зондирования атмосферы за 1959 г. Москвы, Минска, Казани, Минеральных Вод, Волгограда, Львова, Ростова-на-Дону, Риги, при обязательном выполнении следующих условий:

1) нижняя граница облаков, из которых выпадают ледяные элементы, должна располагаться на высоте не менее 2300 м, что, как следует из предыдущего, гарантирует в подавляющем большинстве отсутствие осадков у земной поверхности;

2) выпадающие из этих облаков снежинки должны достигать верхней границы капельного переохлажденного облака;

3) облака, в которые попадают ледяные элементы, должны быть переохлажденными полностью или частично, но так, чтобы средняя температура такого облака была меньше 0° ;

4) температура на верхней границе такого облака должна быть выше -8° , что указывает на отсутствие заметной спонтанной кристаллизации.

Зависимость между осадками, которые достигают земли, мощностью переохлажденного облака и его средней температурой может быть объяснена тем, что скорость роста снежинки в смешанном облаке в огромной степени зависит от разности в давлении пара над водой и льдом при температурах ниже 0° . Эта разность в свою очередь сильно зависит от температуры, возрастая в сторону понижения температуры и достигая максимального значения при $t = -12^\circ$.

Такое положение приводит к уменьшению скорости роста падающей снежинки при повышении температуры, а следовательно, и к увеличению пути, который должна пройти падающая снежинка, чтобы вырасти до некоторого размера R .

Покажем это.

Кинетика процесса сублимационного роста падающей замерзшей капли определяется уравнением диффузии, которое по [8] может быть записано

$$\frac{dR}{dz_{\text{кнд}}} = - \frac{D \mu \Delta E (1 + \alpha \sqrt{Re})}{\rho k N T R [\nu(R) - w]}, \quad (?)$$

где R - радиус капли; z - путь, который проходит падающая капля в облаке; D - коэффициент диффузии водяного пара; μ - молекулярный вес воды; ΔE - пересыщение пара относительно поверхности капли, равное разности между упругостями насыщения пара над

Таблица 2

Пункт	Дата	Параметры переохлажденного облака			Высота н.г.верхнего облака дающего снег, м	Мощность безоблачной прослойки, м	Погода у земли		
		мощность ΔH м	температура на верхней границе	средняя температура град.			t°	u %	явления
Москва	20/У 1959	680	-2,7	-0,1	2930	430	+10,8	60	без осадков
Волгоград	6/Ш	1000	-7,3	-5,3	2970	1080	+ 0,4	92	умеренный дождь
"-	26/1Х	590	-3,0	-2,5	2730	170	+10,7	94	то же
"-	12/Х	920	-4,2	-2,7	3520	1940	+2,0	93	"-
"-	19/Х	190	-2,4	-1,9	3440	1590	+2,4	91	без осадков
"-	18/ХП	1150	-5,3	-6,2	2400	400	-5,9	92	умеренный снег
Минеральные Воды	30/1Х	2320	-7,2	-2,1	4720	1150	+7,2	96	то же
"-	4/Х	530	-4,4	-3,8	2430	220	+5,1	78	полосы падения
Ростов-на-Дону	5/ХП	920	-5,2	-2,7	3660	400	-0,7	98	слабый дождь
Львов	3/1	410	-7,5	-4,1	2790	1320	-0,6	84	слабый снег
"-	20/1У	410	-7,8	-6,5	3680	2050	+1,2	91	умеренный дождь
Рига	23/Х1	1310	-1,5	-0,4	4560	3240	+1,4	98	очень слабый дождь
Минск	8/1У	1400	-3,8	-0,8	3060	630	+5,9	92	умеренный дождь

водой и надо льдом ($E = E_B - E_A$); ρ - плотность воды; K - постоянная Больцмана; N - число Авогадро; $v(R)$ - скорость падения капли; W - вертикальная скорость ветра; Re - число Рейнольдса; a - коэффициент, зависящий от размера капли.

Уравнение коагуляционного роста крупных капель, падающих в монодисперсном облаке, при вертикальной скорости ветра, соизмеримой со скоростью падения облачных капель, с достаточной точностью можно записать

$$\frac{dR}{dz_{кг}} = - \frac{\gamma}{4\rho} \tilde{E}(R), \quad (8)$$

БИБЛИОТЕКА
ЛЕНИНГРАДСКОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
ИНСТИТУТА

175263

где q - водность облака, $\tilde{E}(R)$ - коэффициент захвата.

Уравнение для суммарного роста имеет вид

$$-\frac{dR}{dz} = \frac{4\varrho_m \Delta E (1 + \alpha \sqrt{Re}) + q \tilde{E}(R) k N T R [v(R) - w]}{4\rho k N T R [v(R) - w]} \quad (9)$$

Знак минус в (7), (8) и (9) указывает, что мы следим за падающей в облаке каплей.

Решая относительно z и интегрируя (9), получим

$$-\Delta z = \int_{R_1}^{R_2} \frac{4\rho k N T R [v(R) - w] dR}{4\varrho_m \Delta E (1 + \alpha \sqrt{Re}) + q \tilde{E}(R) k N T R [v(R) - w]} \quad (10)$$

Уравнение (10) выражает путь, который проходит падающая капля, вырастая от начального радиуса R_1 до конечного R_2 . Было произведено численное интегрирование (10) при различных температурах от начального радиуса $R_1 = 5$ мк до конечного $R_2 = 100$ мк при $q = 0,4$ г/м³, $w = 0,5$ см/сек.

Полученные значения Δz при температуре T наносились на график, по оси абсцисс которого откладывались значения температуры в °С, что соответствует средней температуре облака, а по оси ординат - значения Δz в метрах, что соответствует мощности облака, через которое проходит падающая капля, вырастая до размера $R = 100$ мк. Считалось при этом, что снежинка, равновеликая по массе сферической капле $R = 100$ мк, выпадая из облака, полностью не испарится, а дойдет до земной поверхности. Соединив плавной кривой точки, получим график зависимости между осадками, мощностью переохлажденного смешанного облака и его средней температурой. На рис.3 представлен этот график, на котором также нанесены данные опытов по искусственному воздействию на переохлажденные слоистые облака твердой углекислотой и данные из анализа самолетного зондирования атмосферы (табл.2).

Видно, что теоретическая кривая в основном правильно описывает термодинамику процесса осадкообразования в слоистых переохлажденных смешанных облаках.

Искусственное вызывание осадков может с такой же успешностью осуществляться и при температурах на верхней границе облака выше -4° , но для этого необходимы более значительные мощности облака.

Процессы осадкообразования в переохлажденных слоистых облаках совершенно одинаковы как при искусственном воздействии на них твердой углекислотой, так и при естественном засеивании их ледяными элементами извне.

Анализ графика подтверждает также достоверность разделения облаков на смешанные и чисто водяные по значению скорости замерзания на верхней границе облака, если эти облака не "заражаются" извне ледяными элементами.

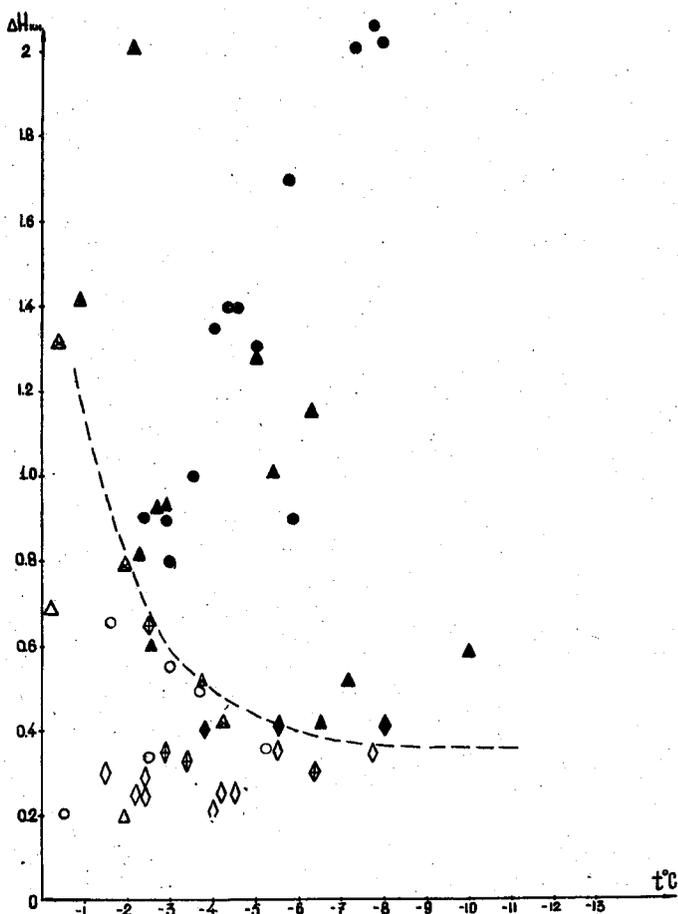


Рис.3. ЗАВИСИМОСТЬ МИНИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО КАПЕЛЬНОГО СЛОИСТОГО ОБЛАКА, ДАЮЩЕГО ОСАДКИ У ЗЕМЛИ, ОТ ЕГО СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ПРИ ИСКУССТВЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЭТО ОБЛАКО ТВЕРДОЙ CO_2 ИЛИ "ЗАРАЖЕНИИ" ЕГО ЛЕДЯНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗВНЕ.

□ - данные ААНИИ [25], ○ - данные ГГО [24], Δ - данные самолетного зондирования. Значок затушеван - осадки, крест - полосы падения или отдельные снежинки, чисто - без осадков.

При естественном, спонтанном замерзании облака в области более высоких температур на верхней границе облака, чем температура интенсивной кристаллизации, повышение необходимой мощности облака, при котором могут образоваться осадки, происходит скачкообразно от 400 до 1800 м, при искусственной кристаллизации облака в этой области температур нарастание необходимой мощности идет плавно. Это еще раз свидетельствует о том, что установленная ранее критическая скорость кристаллизации определяет переход облака из чисто водяного в смешанное.

Перейдем теперь к рассмотрению некоторых вопросов физики образования осадков в чисто водяных облаках.

2. Чисто водяные облака

Аналитическое решение задачи о пересыщении пара и скорости конденсационного и коагуляционного роста капель в водяных облаках с небольшими вертикальными токами было получено Л.Г. Качуриным в работах [4, 8, 26, 27].

Частное решение задачи конденсационно-коагуляционного роста капли для случая установившегося пересыщения согласно [4, 31] имеет вид

$$-\frac{dR}{dz} = \frac{2\mathcal{D}\mu^2\mathcal{E}_\infty}{(\rho k \mathcal{N} T)^2 R [v(R) - w]} \left[\left(1 - \frac{dS}{dt} \frac{\rho (k \mathcal{N} T)^2}{8\pi n \mathcal{E} \mu^2 \mathcal{E}_\infty} \right) \frac{1}{z} - \frac{1}{R} \right] + \frac{q}{4\rho} \frac{\int_z \eta(z) \mathcal{E}(R, z) z^3 \left[\frac{v(R) - v(z)}{v(R) - w} \right] dz}{\int_z \eta(z) z^3 dz}, \quad (11)$$

где \mathcal{E} - удельная поверхностная энергия на границе вода-водяной пар, \mathcal{E}_∞ - упругость насыщения пара при температуре T , \bar{z} - средний радиус капель в облаке, n - концентрация капель в единице массы, $\frac{dS}{dt}$ - изменение удельной влажности насыщения в единицу времени, другие обозначения известны.

С целью выяснения роли различных факторов, влияющих на рост капель, в работах [4, 8] был произведен расчет ряда примеров, которые отличались друг от друга величиной исходных параметров облака.

Расчеты показали, что для диагноза осадков из чисто водяных облаков необходимо точно знать распределение капель по размерам, температуру, водность, вертикальную мощность облака и дефицит влажности воздуха под облаком.

Основой для решения вопроса о том, каков в действительности внутренний механизм развития водяных облаков для превращения их в дождевые, должны послужить, как считает Л.Г. Качурин [4], материалы сопоставления фактических данных с результатами расчетов укрупнения частиц в водяных облаках.

В частности, в [4] указывается, что необходимо выяснить, какие характеристики облаков являются наиболее изменчивыми в процессе их развития, какие, наоборот, наиболее консервативными. Без этого попытки предвычисления осадков из водяных облаков останутся в значительной степени безрезультатными.

Чтобы облегчить задачу по выявлению природных зависимостей между осадками и параметрами чисто водяных облаков, имеет смысл получить теоретические зависимости между скоростью роста капли и последовательными изменением каждого параметра облака.

Упростим прежде всего уравнение (11) для случая монодисперсного развивающегося облака. Это может несколько изменить численный результат, однако, что самое важное, существенно не повлияет на выявление характера искомых зависимостей.

Для монодисперсного облака первое слагаемое уравнения (11), описывающее скорость роста за счет конденсации пара на капле,

может быть представлено

$$-\frac{dR}{dz_{\text{кнз}}} = -\frac{dS}{dt} \frac{1}{R^2 4\pi n [v(R) - w]} \quad (12)$$

Переходя от концентрации капель в единице массы к водности облака с помощью соотношения

$$n = \frac{3q}{4\pi R^2 \rho \rho_e}, \quad (13)$$

где q - водность облака, выраженная в г/см³, ρ - плотность воздуха, получим

$$\frac{dR}{dz_{\text{кнз}}} = \frac{dS}{dt} \frac{R \rho \rho_e}{3q [v(R) - w]} \quad (14)$$

Преобразуем уравнение (14) следующим образом. В [1,28] показано, что, если мы следим за судьбой отдельной частицы, т.е. рассматриваем $\frac{dT}{dt}$, то основными факторами образования облаков будут адиабатическое, трансформационное и радиационное охлаждения.

Так как нас интересуют капельножидкие и притом достаточно мощные облака типа $As - Ns$, которые в основном располагаются выше пограничного слоя атмосферы и в теплую половину года, то можно принять условие адиабатичности и считать, что изменение температуры за счет вертикальных движений намного больше трансформационных и радиационных изменений.

Исходя из такого предположения, можно записать, что

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS}{dT} \frac{dT}{dt} = \frac{dS}{dT} \frac{dT}{dz} \frac{dz}{dt} = -\frac{dS}{dT} \sigma W, \quad (15)$$

так как $\frac{dz}{dt} = W$ - вертикальная скорость ветра, $\frac{dT}{dz} = -\sigma$ - вертикальный температурный градиент в облаке.

Согласно [29] величина $\frac{dS}{dT}$ может быть представлена

$$\frac{dS}{dT} = \frac{\mu_1}{\mu} \frac{\rho_e E_\infty}{PT^2 \Lambda R_n}, \quad (16)$$

где μ_1 - молекулярный вес водяного пара, P - давление воздуха, R_n - удельная газовая постоянная водяного пара, Λ - тепловой эквивалент работы, отношение $\frac{\mu_1}{\mu} \approx 0,622$.

Решая совместно (14), (15) и (16), получим

$$\frac{dR}{dz_{\text{кнз}}} = -0,622 \frac{\rho_e E_\infty R \rho \rho_e \sigma W}{PT^2 \Lambda R_n 3q [v(R) - w]} \quad (17)$$

Второе слагаемое уравнения (11), описывающее коагуляционный рост капли в облаке для случая монодисперсного облака, можно представить в виде

$$\frac{dR}{dz_{\text{кнз}}} = -\frac{q}{4\rho} \tilde{E}(R) \left[\frac{v(R) - v(z)}{v(R) - w} \right] \quad (18)$$

Окончательно упрощенное уравнение для суммарной скорости роста капли, падающей в монодисперсном развивающемся облаке, имеет вид

$$-\frac{dR}{dz} = \frac{4 \cdot 0,622 \alpha E_{\infty} \rho_s^2 R \gamma W + 3 q^2 T^2 P A R_n \tilde{E}(R) [v(R) - v(z)]}{12 q P T^2 A R_n [v(R) - w] \rho} \quad (19)$$

Разделив переменные и интегрируя (19) от z_1 до z_2 и от R_1 до R_2 , получим

$$\Delta z = - \int_{R_1}^{R_2} \frac{12 q P T^2 A R_n \rho [v(R) - w] dR}{4 \cdot 0,622 \alpha E_{\infty} \rho_s^2 R \gamma W + 3 q^2 T^2 P A R_n \tilde{E}(R) [v(R) - w]} \quad (20)$$

Результаты численного интегрирования уравнения (20) при различных значениях T, W, q и при $R_1 = 7$ мк, $R_2 = 150$ мк, $P = 800$ мб представлены на рис. 4.

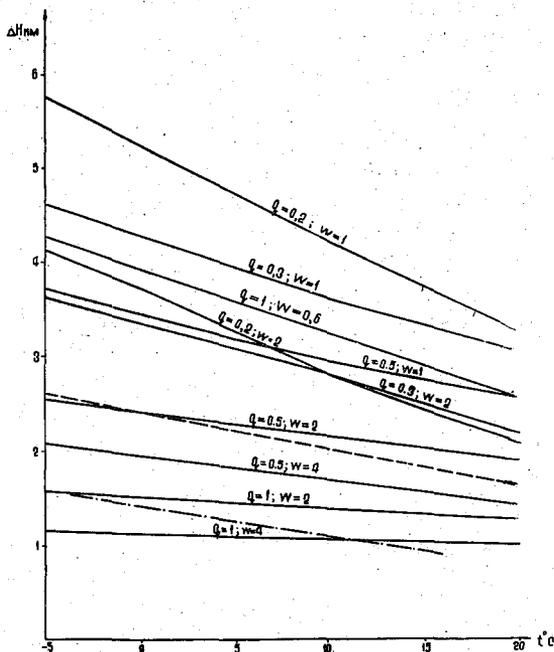


Рис. 4. ЗАВИСИМОСТЬ МИНИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИ СЛОИСТОГО КАПЕЛЬНОГО ОБЛАКА, КОТОРАЯ ТРЕБУЕТСЯ ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ ПАДАЮЩАЯ КАПЛЯ, ПРОХОДЯ ЕЕ, ВЫРОСЛА ДО $R = 150$ мк, ОТ СРЕДНЕЙ ВЛАЖНОСТИ И СРЕДНИХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТОКОВ В ОБЛАКЕ.

Коэффициент захвата рассчитывался по формулам Н.С.Шихкина [5].

Так как величина γ в облаках $As-Ns$ меняется незначительно [1,30], ее мы приняли постоянной и равной $0,5^\circ/100$ м. Из рис. 4 видно, что для того, чтобы капля, падая в чисто водяном облаке, выросла от начального радиуса 7 мк до конечного 150 мк при различных значениях T, W и q , ей необходимо проходить различ-

ные отрезки пути. Так, при средней водности $0,2 \text{ г/м}^3$, средней температуре облака 0° и средней вертикальной скорости 1 см/сек. падающая капля вырастет до $R_2 = 150 \text{ мк}$ в облаке толщиной не менее 5200 м , в то время как при $q = 0,5 \text{ г/м}^3$, $W = 2 \text{ см/сек.}$ и $T = 0^\circ$ потребуется мощность облака только 2400 м . Существенно будет меняться мощность облака и в зависимости от изменения средней температуры. Выполненные нами расчеты находятся в хорошем согласии с расчетами работ [4,8].

К сожалению, отсутствие регулярных и надежных данных о водности облаков и вертикальных токах не позволяет построить природные зависимости между осадками и этими параметрами для чисто водяных облаков. Данные о температуре и мощности облаков, если они наблюдаются, имеются в протоколах каждого самолетного подъема. Это дает возможность выявить естественную связь между осадками, мощностью и средней температурой чисто водяных облаков.

Выше, рассматривая рис.2, мы не остановились на анализе хода кривой связи при значениях $\lg \frac{dn}{dt} < -6,2$, указав только, что в этом случае мы имеем дело с чисто водяными облаками. Из графика рис.1 видно, что при малых значениях $\lg \frac{dn}{dt}$ влияние вертикальных токов на величину скорости замерзания уменьшается. Таким образом, $\lg \frac{dn}{dt} \sim f(T)$. Это значит, что с уменьшением $\lg \frac{dn}{dt}$ происходит повышение температуры на верхней границе облака, а следовательно, и повышение его средней температуры. В таком случае участок кривой на рис.2 при значениях $\lg \frac{dn}{dt} < -6,2$ можно рассматривать как зависимость между осадками, температурой и мощностью чисто водяного облака. Для этого дополнительно к имеющимся данным были привлечены самолетные подъемы в указанных выше пунктах за теплое полугодие с 1954 по 1958 г. Данные отбирались при следующем условии: облака должны быть капельные, что при отрицательных температурах характеризовалось критерием $\lg \frac{dn}{dt}$, видом осадков, если они наблюдались, и визуальной оценкой наблюдателя. При положительных температурах это условие автоматически выполнялось.

Дополнительно были включены данные самолетных подъемов из работ [2,5,6]. Всего было использовано около 1000 самолетных подъемов в чисто водяных облаках.

Для каждого случая рассчитывалась средняя температура облака как полусумма температур на верхней и нижней границах и мощность облака. Затем эти данные наносились на график, по оси абсцисс которого откладывались значения средней температуры облака $t^\circ \text{C}$, а по оси ординат мощность $\Delta \text{ Н км}$. Если при этом наблюдался умеренный дождь, ставился значок \blacktriangle , если очень слабый дождь $-+$, если морось $- \bullet$, без осадков $- \circ$.

Разделив области умеренного дождя от очень слабого дождя и мо-

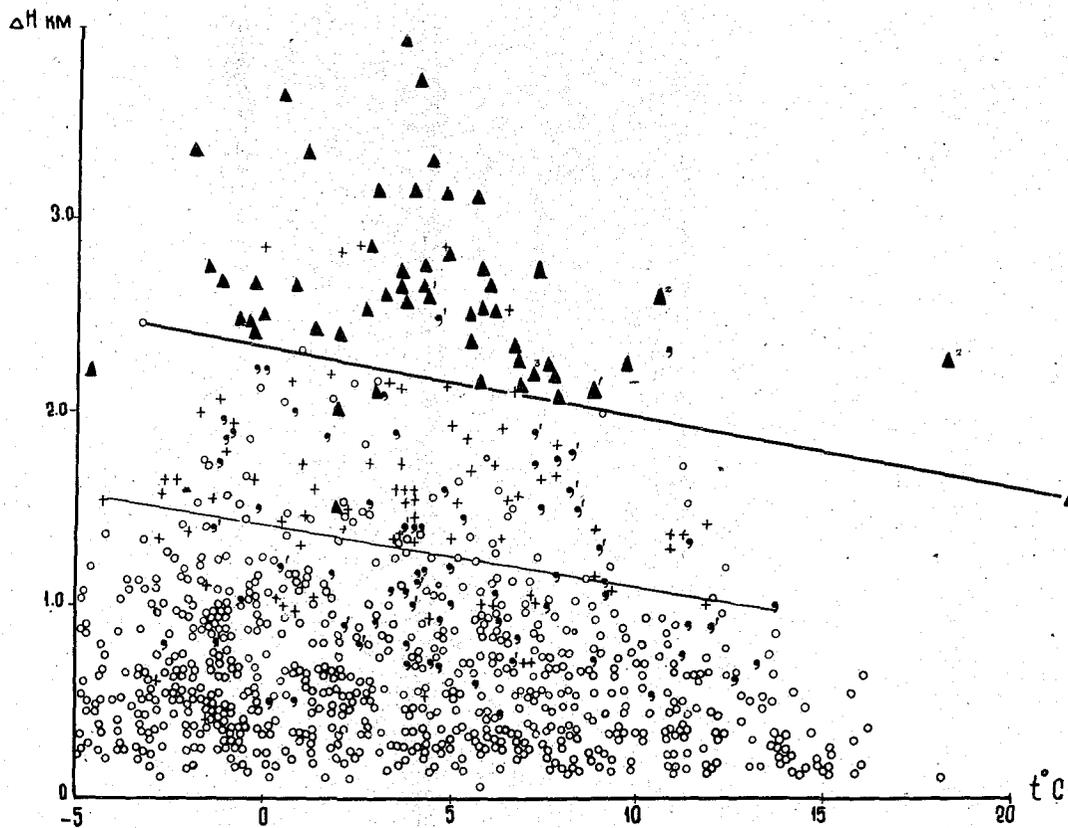


Рис.5. ЗАВИСИМОСТЬ МИНИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ЧИСТО
 ВОДЯНОГО СЛОИСТОГО ОБЛАКА, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗА-
 МЕТНОГО ДОЖДЯ, ОТ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛАКА

роси, а последнюю от области отсутствия осадков, мы получили график зависимости между осадками, мощностью и средней температурой облака.

Этот график представлен на рис.5.

Видно, что, если параметры облака таковы, что точка на графике окажется выше кривой, разделяющей умеренные осадки от очень слабых или морозящих, то в этом случае мы в 95% случаев будем наблюдать осадки у земной поверхности, из которых 90% будут умеренными или сильными. Кривая, разделяющая область отсутствия осадков от области мороси или очень слабого дождя, определяет 50% вероятность этих явлений.

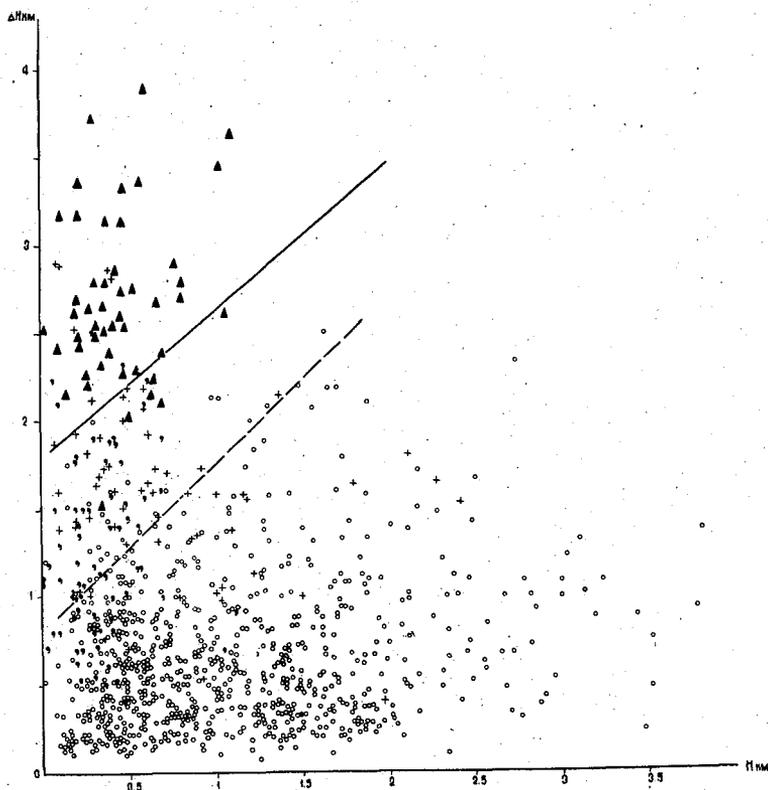


Рис.6. ВЕРОЯТНОСТЬ ВЫПАДЕНИЯ ОСАДКОВ ДО ЗЕМЛИ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ВЕРТИКАЛЬНОЙ МОЩНОСТЬЮ
И ВЫСОТОЙ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ЧИСТО ВОДЯНОГО СЛОЙСТОГО ОБЛАКА.

Сравнение полученных природных кривых связи между осадками, мощностью облака и его средней температурой с расчетными (см. рис. 4, на котором природные кривые проведены пунктирными линиями) показывает, что в природе действительно имеется зависимость между параметрами облака и осадками такого типа, как подсказывает теория [4,8]. Более строгий учет параметров облака позволил бы производить и более точный расчет осадков, но в настоящее время сделать это не представляется возможным, так как мы не располагаем надежными и регулярными данными о водности, величине и характере распределения вертикальных скоростей в облаке.

Однако полученный результат позволяет уже сейчас использовать его в синоптической практике в целях диагноза и прогноза обложных осадков.

В заключение остановимся на зависимости выпадения осадков у земли от соотношения между вертикальной мощностью и высотой нижней границы чисто водяного слоистого облака, что обсуждалось ранее в § 1. На рис. 6 представлена эта зависимость. График построен по материалам самолетного зондирования атмосферы в чисто водяных облаках, которые использовались при построении графика рис. 5.

Из рис. 6 видно, что между выпадением осадков у земли, мощностью и высотой нижней границы чисто водяного облака обнаруживается четкая зависимость. Рисунок 6 подтверждает выводы работ [2,4,8 и др.] о характере процессов осадкообразования в чисто водяных облаках и влиянии влажности и мощности подоблачного слоя на выпадение осадков у земли.

З а к л ю ч е н и е

Как известно, в настоящее время синоптик делает заключение о вероятности выпадения осадков по характеру ожидаемой формы облаков, исходя из сложившейся к моменту составления прогноза конкретной синоптической обстановки. Это очень часто не приносит положительного результата, и поэтому прогноз осадков даже при правильном прогнозе синоптического положения имеет более низкую оправдываемость, чем другие метеорологические элементы.

А.С.Зверев [21] указывает, что прогнозы осадков затруднены, помимо прочего, и невозможностью учета микрофизического строения облаков и тех процессов, которые влияют на укрупнение элементов облака.

В настоящей работе показано, что некоторые закономерности физики обложных осадков, разработанные теоретически, правильно отображают природу этого явления.

Полученные эмпирические зависимости между доступными для измерения и предвычисления параметрами облака и осадками уже сейчас могут быть использованы в синоптической практике, так как они позволяют качественные соображения заменить количественным расчетом.

Л и т е р а т у р а

1. Б о р о в и к о в А.М. и др. Физика облаков. Гидрометеоздат, Л., 1961.
2. М е й с о н Б.Дж. Физика облаков. Гидрометеоздат, Л., 1961.
3. J. Podzimek. Fyzika oblaku a srážek. nakladatelství Československé akademie věd. Praha, 1959
4. К а ч у р и н Л.Г. Образование осадков в облаках с малыми вертикальными токами. Изв.АН СССР, серия геофиз., № 2, 1956.
5. Ш и ш к и н Н.С. Облака, осадки и грозовое электричество. Гостехтеориздат, М., 1954.
6. Peppler W. Unterkülte Wasserwolken und Eiswolken. Forsch. u. Erfahr. Reichsanst. f. Wetterdienst B. I, 1940.
7. З а к Е.Г. Микроструктура фронтальных облаков. Метеорология и гидрология, № 6, 1949.
8. К а ч у р и н Л.Г. и др. Анализ вон осадков из фронтальных облаков слоистых форм. Труды ЛГМИ, вып.5-6, Л., 1956.
9. Б е р ж е р о н Т. Физика облаков и осадков. Сб. "Физика образования осадков", ИЛ, М., 1951.
10. Ф и н д а й з е н В. Коллоидально-метеорологические явления при образовании осадков. Сб. "Физика образования осадков", ИЛ, М., 1951.
11. А н т о н о в В.С. Анализ условий выпадения осадков на облаках слоистых форм. Сб. работ по региональной синоптике, № 6, Гидрометеоздат, М., 1962.
12. Б о р о в и к о в А.М. Некоторые результаты исследований структуры кристаллических облаков. Труды ЦАО, вып.10, 1958.
13. З а в а р и н а М.В. Аэроклиматические факторы обледенения самолетов. Гидрометеоздат, Л., 1960.
14. К а ч у р и н Л.Г. Замерзание монодисперсных водных аэрозолей. Изв.АН СССР, серия геофиз., № 2, 1951.
15. К а ч у р и н Л.Г. Замерзание полидисперсных водных аэрозолей. Там же.
16. К а ч у р и н Л.Г. Сравнение различных уравнений замерзания переохлажденных водных

- аэрозолей. Изв.АН СССР, серия гео-
физ., № 1, 1959.
17. Антонов В.С. О зависимости между вертикальными
токами и температурой интенсивной
кристаллизации во фронтальных об-
лаках слоистых форм. Метеорология
и гидрология, № 6, 1962.
18. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды, часть 1. Гид-
рометеиздат, Л., 1955.
19. Singleton F. Aircraft observations of rain and drizzle
from layer clouds. Quart. J.R. Met. Soc.,
v. 86, N 368, 1960
20. B.J. Mason, B.P. Howorth. Some characteristics of stratiform clouds
over North Ireland in relation to their
precipitation. Quart. J. R. Met., Soc.,
vol. 78, N 336, 1952.
21. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. Гид-
рометеиздат, Л., 1957.
22. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды, часть II.
Гидрометеиздат, Л., 1954.
23. Искусственное воздействие на облака и осадки. Техническая
справка № 13 (перевод с английского). Гидрометеиздат, Л.,
1957.
24. Никандров В.Я., Чуваев А.П. Сводные данные
об опытах по воздействию на об-
лака сухим льдом. Труды ГГО,
вып.20, 1958.
25. Морачевский В.Г., Никандров В.Я. Эффек-
тивность частиц CO_2 и дыма AgI
для рассеивания переохлажденных
низких облаков. Труды ААНИИ,
т.228, 1959.
26. Качурин Л.Г., Алантьева Л.Е., Ся Юй-
жень. Концентрация пара и скорость рос-
та капель конденсата в водных аэ-
розолях. Изв.АН СССР, серия гео-
физ., № 9, 1961.
27. Качурин Л.Г. О пересыщении пара и конденса-
ционном росте капель в водяных об-
лаках. Метеорология и гидрология,
№ 8, 1958.
28. Абрамович К.Г., Хргиан А.Х. Исследование ус-
ловий возникновения слоистообраз-
ной облачности нижнего яруса. Тру-
ды ЦАО, вып.28, 1960.
29. Качурин Л.Г. О связи между вертикальными дви-
жениями в атмосфере и интенсив-

30. 3 а к Е.Г.

ностью осадков из фронтальных облаков слоистых форм. Труды ГГО, вып. 76, 1958.

Характеристика фронтальной облачности по данным самолетных подъемов. Метеорология и гидрология, № 8, 1937.