

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барсуков О. М., Сквородкин Ю. П. Магнитные наблюдения в районе взрыва в Медве. — Физика Земли. 1969, с. 68—69.
2. Эпов Б. А. Основы взрывного дела. М.: Изд. 1974, стр.

Известия АН АрмССР, Науки о Земле, XXXIX, № 4, 69—74, 1986

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 551.576:551.558.21

Г. Р. ТОРОЯН

## О ВЛИЯНИИ РАЗМЕРА ПРЕПЯТСТВИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ НА МЕЗО- И МИКРОСТРУКТУРУ ОРОГРАФИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ

Исследование орографических облаков, образующихся при обтекании горного препятствия воздушным потоком, необходимо для решения многих проблем горной метеорологии, в частности, для оценки облачных ресурсов, совершенствования методов прогноза погоды, для обеспечения безопасности полетов в горных районах и др. Наземные методы исследования орографических облаков дают неполную информацию, а самолетные методы — ограничены правилами техники безопасности полета в горных районах. При этом возрастает роль методов математического моделирования при исследовании динамики обтекания и мезо- и микроструктуры облаков. В работах [4, 5, 7, 8], в которых рассчитывались динамические характеристики обтекания, показано, что картина обтекания имеет волновую структуру. В работе [5], кроме динамических характеристик обтекания, была исследована также структура границ орографических облаков, но их микроструктура не учитывалась. В работах Янга [15], Коттона, Никерсона. [1, 3, 6] более детально рассчитывалась микроструктура облаков, но часто динамика рассматривалась в приближении квазистатики, не учитывалась волновая структура обтекания и турбулентный перенос субстанций.

В работах [10, 13] разработана двумерная нестационарная микрофизическая численная модель образования и эволюции орографических облаков с учетом микроструктуры облаков, их фазового состояния и волнового характера обтекания хребта. Ситуация, аналогичная моделируемой, возникает, например, в зимних условиях при обтекании юго-западным потоком Гегамского хребта, когда с наветренной стороны, а также за хребтом над Севаном образуются стабильные валы орографических облаков, которые согласно исследованиям [2, 9] являются переохлажденно-капельными.

Динамика обтекания (поля вертикальной ( $W$ ) и горизонтальной ( $U$ ) скоростей ветра) рассчитывалась путем решения линейного неоднородного волнового уравнения Гельмгольца для функции тока [5, 7]:

$$\Delta\psi + K^2\psi = -K^2 U_0 Z.$$

При решении (1) профиль рельефа аппроксимировался полуцилиндром радиуса  $R_0$ .

Скорости  $U$ ,  $W$  находились из соотношения  $U = \frac{\partial\psi}{\partial Z}$ ,  $W = -\frac{\partial\psi}{\partial X}$  [5, 7, 10, 12].

Эволюцию полей температуры ( $T$ ), влажности ( $q$ ), функций распределения по размерам капель ( $f_1$ ) и кристаллов ( $f_2$ ) удобно рассчитывать к криволинейной системе координат ( $X' = X$ ,  $Z' = Z - h(x)$ ). После преобразования к ней уравнения переноса тепла, влаги, кинетические уравнения для  $f_1$  и  $f_2$  в матричном виде примут следующий вид:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \tilde{U} \frac{\partial\varphi}{\partial x'} + \tilde{W}' \frac{\partial\varphi}{\partial Z'} = \frac{\partial}{\partial x'} K_x \frac{\partial\varphi}{\partial x'} + \frac{\partial}{\partial Z'} K_z \frac{\partial\varphi}{\partial Z'} + I, \quad (2)$$

$$\varphi = \begin{pmatrix} T \\ q \\ f_i \end{pmatrix}, \quad \tilde{U}' = \begin{pmatrix} U' \\ U' \\ U' \end{pmatrix}, \quad W' = \begin{pmatrix} W' \\ W' \\ W' - V_i(r_i) \end{pmatrix}, \quad I = \begin{pmatrix} \frac{L_i}{c_p} \varepsilon_{cl} - \left( W' + U \frac{dh}{dx} \right) \gamma a \\ - \varepsilon_{cl} \\ - \frac{\partial}{\partial r_i} (r_i f_i) + \left( \frac{\partial f_i}{\partial t} \right)_{col} + I_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

Здесь  $U' = U$ ,  $W' = W - U \frac{dh}{dx}$ ,  $h(X)$  — профиль рельефа;  $\varepsilon_{cl}$  — скорости конденсации и сублимации;  $r_i$  — скорости конденсационного и сублимационного роста капель и

кристаллов;  $\left(\frac{\partial f_i}{\partial t}\right)_{col}$  — скорость изменения спектров капель и кристаллов за счет коагуляции и аккреции. Остальные обозначения общепринятые и приведены в [1, 10, 11, 12, 13, 14].

В данной работе с помощью модели [10, 13] исследованы мезо- и микроструктуры орографической облачной системы при различных размерах препятствия, метеопараметров (температуры, влажности и др.).

В табл. 1 приведены значения параметров  $R_0$  — радиус цилиндра,  $T_0, q_{T0}$  — температура и влажность на поверхности земли,  $\Lambda_D$  — параметр распределения влажности по высоте, которые соответствуют различным вариантам расчета.

Таблица 1  
Параметры модели, используемые в вариантах расчета

Параметры модели	$q_{T0}, \%$	$R_0, м$	$T_0, К$	$\Lambda_D, км$
Вариант №				
1	65	600	280,15	20
2	65	400	258,15	10
3	85	400	268,15	10
4	85	200	268,15	10
5	95	400	268,15	4

Область счета по горизонтали 20 км, по вертикали — 9 км. Центр горы расположен в точке  $X=10$  км,  $Z=0$ . В варианте 1 выбирались следующие значения параметров:  $q_{T0}=65\%$ ,  $R_0=600$  м,  $T_0=280,15^\circ К$ ,  $\Lambda_D=20$  км, который назовем основным набором параметров (ОНИ). Поля функции тока и вертикальных скоростей при расчетах с ОНИ представлены на рис. 1. Максимальная скорость  $W_{max}=2,3$  м/с наблюдается в точке  $X=12$  км,  $Z=1$  км, минимальная  $W_{min}=2,1$  м/с — за горой ( $X=14$  км,  $Z=1,6$  км). Наиболее сильно возмущения развиты с подветренной стороны (подветренные волны), знаки вертикальных скоростей  $W \sim \mp 0,6-1$  м/с чередуются,

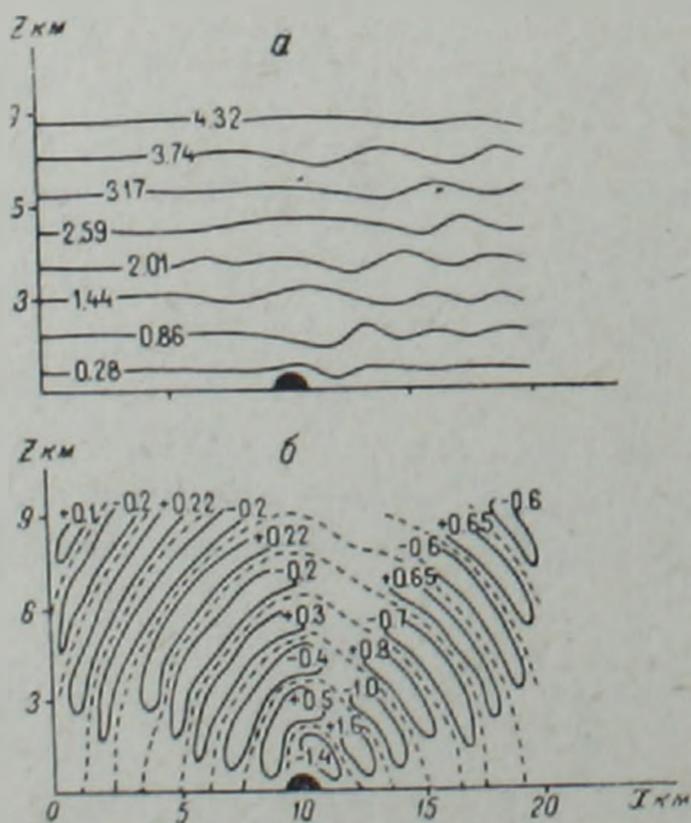


Рис. 1. Поля функций тока  $\psi$ ,  $—10^8$  см<sup>2</sup>/с (а) и вертикальных скоростей  $W$ , м/с (б) в варианте с ОНИ (пунктир изолинии  $W=0$ ).

а амплитуды уменьшаются и смещаются вниз по потоку с ростом высоты (так называемый «эффект обращения»). Важно, что возмущения, хотя и гораздо меньшей, амплитуды  $W \sim \pm 15-20$  см/с существуют и с наветренной стороны, т. е. гора вызывает волновые возмущения и с наветренной стороны, причем до больших высот, что является следствием сжимаемости натекающего потока. Такая картина обтекания, обнаруженная В. Н. Кожевниковым, находится в качественном согласии с наблюдениями [4, 5, 6, 7]. Из-за наличия максимальных восходящих движений  $W \sim 1,5-2$  м/с, в расчетах с ОНИ впервые конденсация начинается через 30 мин в областях  $W_{max}$ . Со временем поля температуры и влажности, которые в начальный момент были «не согласованы» с динамикой обтекания, все больше адаптируются к полю скоростей. В

областях восходящих движений происходит охлаждение, возникает пересыщение и образуется облачность.

Как видно из рис. 2, в течение 2 часов эволюции образуется сложная многоярусная орографическая облачная система. С наветренной стороны имеется сплошной слой облаков на высотах 1—5 км, состоящий из сомкнутых облачных валов в нижнем и среднем ярусах, соответствующих областям восходящих движений и представляющих собой систему Sc—Ac. Отчетливо вырисовывается облачная шапка над горой. С подветренной стороны этот слой разбивается на отдельные валы, повторяющие конфигурацию восходящих токов и разделенные безоблачными промежутками с большими нисходящими движениями. Эти валы соответствуют облакам Acind [5]. Интересно, что в верхнем ярусе, на высотах 8—9 км образуется слой перистых облаков. Механизм их образования следующий. При заданных в ОНП профилях температуры и влажности на этих высотах существует положительное пересыщение надо льдом. При попадании натекающего потока в область восходящих движений реализуются оба ус-

ловия, необходимые для активации ядер сублимации:  $\Delta_2 > 0$ ,  $\frac{\partial T}{\partial t} < 0$  ( $\Delta_2$  — пересыщение надо льдом) и образуются ледяные кристаллы, которые растут за счет сублимации. И хотя ниже по потоку они могут попадать в области нисходящих движений, где  $\frac{\partial T}{\partial t} > 0$ , по-прежнему в них  $\Delta_2 > 0$  и рост кристаллов продолжается. Это объясняет

частую повторяемость перистых облаков в горных районах. Как ясно из предыдущего, для их образования необходимо, чтобы температура и влажность на этих высотах были такими, чтобы было  $\Delta_2 > 0$ .

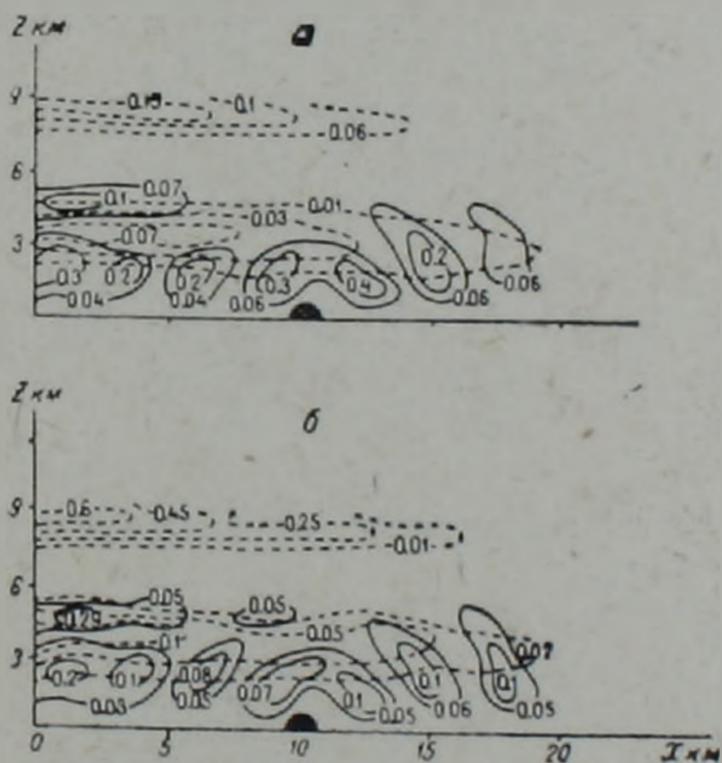


Рис. 2. Поля водности  $q_{L1}$ , ледности  $q_{L2}$ ,  $g/kg$  (а) и концентрации капель  $N_1$ ,  $10^6 g^{-1}$  и кристаллов,  $10^3 g^{-1}$  (б) в варианте с ОНП через 2 ч эволюции облачности ( $t=2.5$  ч).

Как отмечено в монографии [6], в горных районах часто наблюдаются двух-трехслойные облачные системы. Именно такую ситуацию иллюстрирует рис. 2, где приведены двумерные поля водности и ледности, концентрации капель и кристаллов.

Как видно из рис. 2, через 2 часа эволюции в области «шапки» и с подветренной стороны, сохраняет конфигурацию в виде отдельных валов, повторяющих конфигурацию поля восходящих скоростей. Это обусловлено тем, что происходит постоянная активация ядер конденсации при переносе их горизонтальными и вертикальными потоками из области нисходящих движений в область восходящих. На больших расстояниях перед горой ( $X=0-6$  км) также видны очаги водности, обусловленные теми же причинами, однако здесь водность в слое 2,5—4,5 км почти исчезает вследствие кристаллизации на этих высотах. Выше нулевой изотермы, которая находится на высоте 0,6 км, происходит интенсивное замерзание капель, ледность достигает 0,05—0,07  $g/kg$ , а концентрация кристаллов—10—20  $g^{-1}$ . Наличие концентрации кристаллов ( $N_2 \sim 5 g^{-1}$ ) и ледности ( $q_{L2} \sim 0,04 g/kg$ ) в облаках Sc—Ac обусловлено их переносом с наветренной части по потоку. Характерные значения микрофизических параметров орографической облачной системы приведены в табл. 2.

При уменьшении размера препятствия ( $R_0=400$  м) и при более быстром убывании влажности по высоте ( $\Delta D=10$  км) (вариант 2) конденсация начинается позже (через 1 ч, 20 мин). При этом облакообразование происходит медленнее, а облака верхнего яруса Si—Cs отсутствуют (рис. 3). Малая мощность ( $\Delta H=2$  км) и малое влагосодержание ( $q_{L1} \sim 0,05-0,09 g/kg$ ), а также медленный процесс облакообразования Sc—Ac, объясняются наличием относительно маленьких восходящих движений

Таблица 2

Характерные значения водности ( $q_{L1}$ ), ледности ( $q_{L2}$ ), концентрации капель ( $N_1$ ) и ( $N_2$ ) через 2 ч эволюции географической облачной системы

Вариант №	$\frac{W_{\max}, \text{ м/с}}{W_{\min}, \text{ м/с}}$	Время начала конденсации (мин)	Облака низкого и среднего яруса Sc—Ac (с наветренной стороны)			„Облачная шапка“ и подветренные облачные валы Sc—Ac и nd		Облака среднего яруса Ci—Cs
			$\Delta h, \text{ км}$	$\frac{N_1, 10^6 \text{ з}^{-1}}{N_2, \text{ з}^{-1}}$	$\frac{q_{L1}, \text{ г/кг}}{q_{L2}, \text{ г/кг}}$	$\frac{N_1, 10^6 \text{ з}^{-1}}{N_2, \text{ з}^{-1}}$	$\frac{q_{L1}, \text{ г/кг}}{q_{L2}, \text{ г/кг}}$	$\frac{N, \text{ з}^{-1}}{q_{L2}, \text{ г/кг}}$
1	$\frac{2,3}{-2,1}$	30	4,2	$\frac{0,05-0,17}{10-20}$	$\frac{0,2-0,3}{0,05-0,07}$	$\frac{0,06-0,1}{2-5}$	$\frac{0,4-0,5}{0,03-0,04}$	$\frac{30-50}{0,08-0,15}$
2	$\frac{1}{-0,9}$	80	2	$\frac{0,05-0,14}{1-3}$	$\frac{0,05-0,09}{0,01}$	$\frac{0,04-0,08}{-}$	$\frac{0,05-0,08}{-}$	$\frac{-}{-}$
3	$\frac{1}{-0,9}$	40	4	$\frac{0,07-0,2}{5-10}$	$\frac{0,1-0,2}{0,02-0,03}$	$\frac{0,03-0,07}{1-3}$	$\frac{0,1-0,15}{0,005-0,01}$	$\frac{15-30}{0,04-0,06}$
4	$\frac{0,3}{-0,25}$	105	3,5	$\frac{0,04-0,1}{0,9-2}$	$\frac{0,07-0,1}{0,01}$	$\frac{0,04-0,09}{1-2}$	$\frac{0,07-0,09}{0,005}$	$\frac{15-30}{0,01-0,03}$
5	$\frac{1}{-0,9}$	5—10	4,8	$\frac{0,1-0,3}{0,01-0,02}$	$\frac{0,1-0,25}{0,002}$	$\frac{0,05-0,1}{-}$	$\frac{0,13-0,2}{-}$	$\frac{10-20}{0,02-0,04}$

в варианте 2, чем при ОНП. Малая водность приводит к тому, что при замерзании капель ледность ( $q_{L_2} \sim 0,01 \text{ г/кг}$ ) и концентрация кристаллов ( $N_2 \sim 1-3 \text{ г}^{-1}$ ) тоже малы по сравнению с ОНП. Отсутствие же облаков верхнего яруса обусловлено первоначальным распределением влажности по высоте. На высотах 7—9 км начальная относительная влажность составляет 20—40% и даже при наличии восходящих движений 5—8 см/с не достигается условие насыщения ни над водой, ни над льдом.

Как видно из табл. 2, при увеличении начальной приземной влажности на 20% (вариант 3), чем при ОНП, конденсация начинается через 40 мин. При этом водность и ледность облаков Sc—Ac на 25—30% меньше, чем в расчетах с ОНП, что обусловлено малыми восходящими движениями (0,8—1 м/с) в варианте 3. Но благодаря большой начальной влажности, мощность, водность и ледность этих облаков на 40—50% больше, чем в варианте 2. Этим же обусловлено образование облаков верхнего яруса Ci—Cs, ледность и концентрация кристаллов в которых достигает соответственно  $q_{L_2} \sim 0,04-0,06 \text{ г/кг}$  и  $N_2 \sim 15-30 \text{ г}^{-1}$ .

Уменьшение радиуса цилиндра  $R_0 = 200 \text{ м}$  (вариант 4) приводит к уменьшению  $W$  ( $W_{\text{max}} \sim 25-30 \text{ см/с}$ ), что является причиной более медленного развития процессов

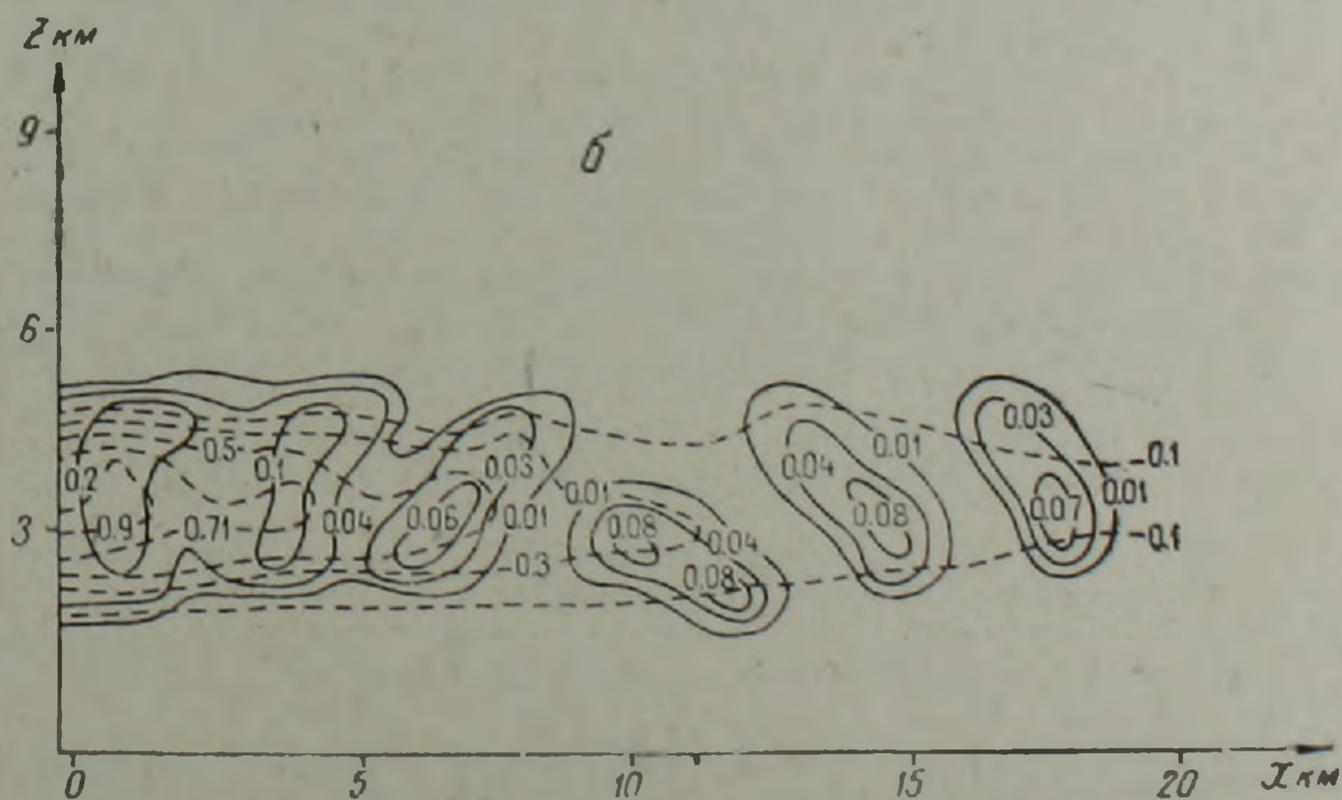
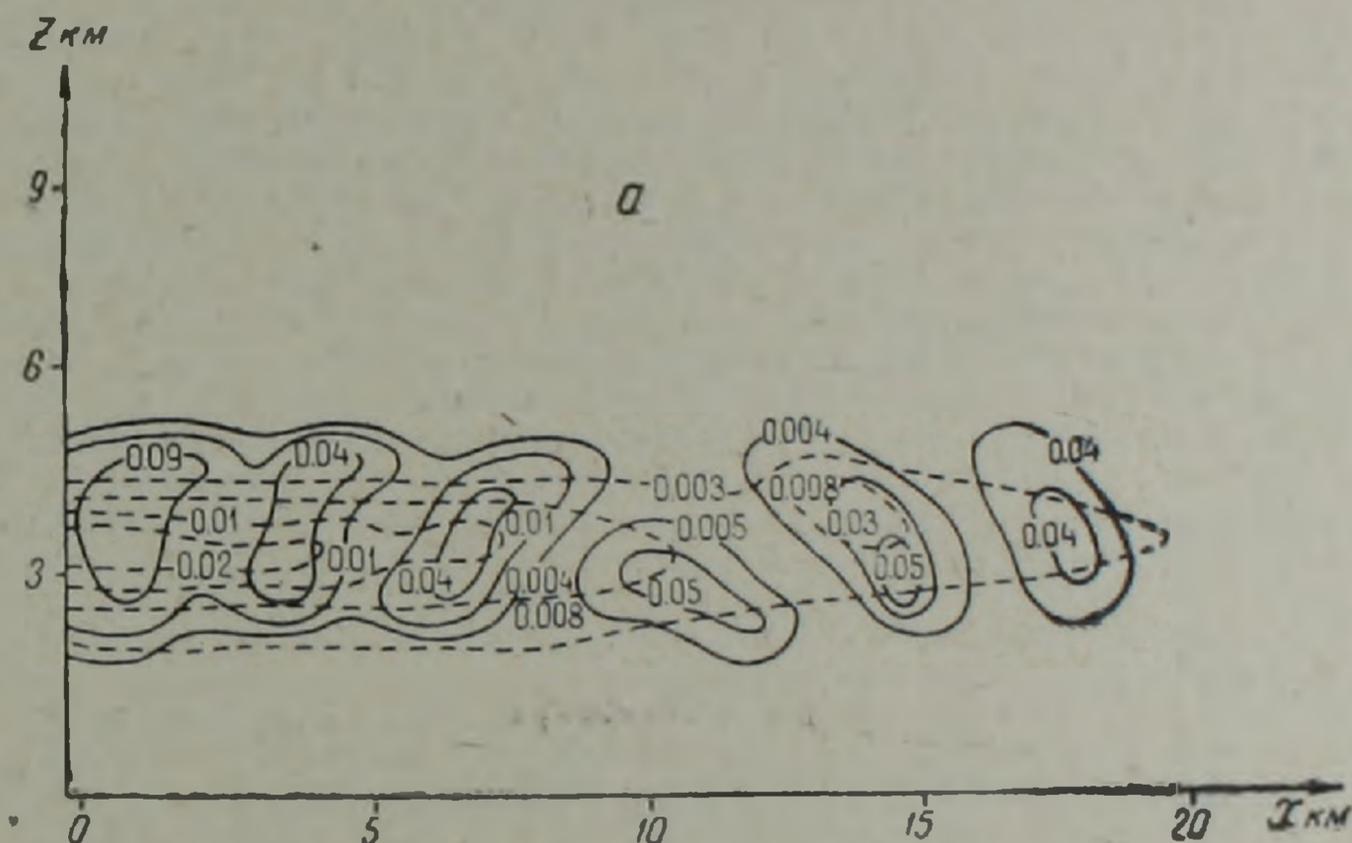


Рис. 3. Поля водности, ледности, г/кг (а), концентрации капель,  $10^5 \text{ г}^{-1}$  и кристаллов,  $10^3 \text{ г}^{-1}$  (б) в варианте 2 через 2 ч эволюции облачности.

осадкообразования (через 1 ч 45 мин), чем при ОНП. Через 2 ч эволюции облачной системы, водность облаков Sc—Ac достигает  $0,07-0,1 \text{ г/кг}$ , а ледность  $0,5-0,9 \cdot 10^{-2} \text{ г/кг}$ . Водность в облачных валах Acupnd и в облачной «шапке»  $0,08 \text{ г/кг}$ . Хотя в варианте 4  $W_{\text{max}}$  меньше, чем при расчетах с ОНП, тем не менее благодаря высокой начальной относительной влажности, на высотах  $Z \sim 7-9 \text{ км}$  образуются облака верхнего яруса Ci—Cs с ледностью  $0,01-0,03 \text{ г/кг}$ . Более того, из-за небольшого недосыщения по отношению ко льду в областях  $Z \sim 5-7 \text{ км}$ , вызванного маленькими отрицательными  $W$  ( $W_{\text{min}} \sim -2,7 \text{ см/с}$ ), часть кристаллов  $N_2 \sim 0,1 \text{ г}^{-1}$ , выпадая из облаков Ci—Cs, достигает вершины облаков Ac, т. е. происходит засев облаков среднего яруса из верхнего. Это так называемый эффект „seeder—feeder“.

Кроме расчетов над сухой поверхностью земли, исследовано также образование мезо- и микроструктур облаков над поверхностью, покрытой снегом ( $q_{го} = 95\%$ ,  $R_0 = 400$  м,  $A_0 = 4$  км) (вариант 5). При этом благодаря большой приземной влажности (95%), конденсация начинается довольно быстро (через 5 мин). Мезоструктура образующихся орографических облаков в варианте 5 аналогична системе облаков, полученной в вариантах 1, 3. Но при этом они сильно различаются своей микроструктурой. При расчетах над снежной поверхностью, относительная влажность на всех высотах большая, испарение капель в областях нисходящих движений происходит медленнее, чем над почвой, сохраняется большое число мелких капель, их средний радиус в облаках Sc—Ac 3—4 мкм, вероятность их замерзания мала ( $M_1 \sim r_1^3$ ) [1, 6]. Поэтому облака Sc—Ac в варианте 5 являются почти чисто капельными (см. табл. 2). Концентрация кристаллов и ледность в Ci—Cs достигает  $10\text{--}20 \text{ г}^{-1}$  и  $0,03\text{--}0,04 \text{ г/кг}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанной в [10, 13] модели исследованы образование, мезо- и микроструктура орографической облачной системы, образующейся при различных начальных метеопараметрах (температура, влажность, их распределение по высоте) и размерах препятствия. Показано, что при определенных сочетаниях параметров нисходящего потока и размера препятствия может образоваться многоярусная облачная система со сложной микроструктурой. Мезо- и микроструктура облаков сильно зависят от начальной влажности, ее распределения по высоте и от размера препятствия. Исследованы случаи образования облаков верхнего яруса Ci—Cs. Обнаружен эффект «seeder-feeder» (вариант 4), засев облаков среднего яруса из облаков верхнего яруса.

В заключение автор выражает глубокую благодарность В. И. Хворостьянову за весьма ценные советы и внимание к работе.

Центральная аэрологическая  
обсерватория

Поступила 25.III. 1986.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Буйков М. В. Численное моделирование облаков слоистых форм. Обзор.—Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 1978, 63 с.
2. Воронов П. С. О параметрах переохлажденных слоистообразных облаков в бассейне оз. Севан.—Труды УкрНИИ, 1983, вып. 193, с. 78—83.
3. Деннис А. Изменение погоды засевом облаков.—М., Мир, 1983, 272 с.
4. Зейтунян Х. И. Нелинейная задача образования облачности за препятствием.—Изв. АН СССР, серия геофизическая, 1963, № 9, с. 1427—1437.
5. Кожевников В. Н. Орографические возмущения в двумерной стационарной задаче.—Изв. АН СССР, ФАО, 1968, № 1, с. 33—52.
6. Мазин И. П., Шметер С. М. Облака. Строение и физика образования.—Л., Гидрометеониздат, 1983, 279 с.
7. Матвеев Л. Т. Динамика облаков.—Л., Гидрометеониздат, 1981, 311 с.
8. Мусаелян Ш. А. Волны препятствий в атмосфере. Л., Гидрометеониздат, 1962, № 11, 142 с.
9. Лесков Б. Н., Червоный Н. П. Поле облачности в бассейне оз. Севан зимой при юго-западном переносе.—Труды УкрНИИ, 1976, вып. 144, с. 30—52.
10. Тороян Г. Р., Хворостьянов В. И. Моделирование орографических облаков с учетом микроструктуры капельной и кристаллической фаз.—Труды ЦАО, 1986, вып. 163, с. 105—116.
11. Тороян Г. Р., Хворостьянов В. И. Численное моделирование самолетного засева орографических облаков с целью увеличения осадков. Труды ЦАО, 1986, вып. 164, с. 78—86.
12. Хворостьянов В. И. Моделирование искусственной кристаллизации и рассеяния переохлажденных туманов.—Метеорология и гидрология, 1984, № 3, с. 21—30.
13. Хворостьянов В. И., Тороян Г. Р. Микрофизическая численная модель зимних орографических облаков, осадков и воздействия на них.—Метеорология и гидрология, 1986, № 8, с. 43—54.
14. Численное моделирование облаков. (Коган Е. Л., Мазин И. П., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И.)—М., Гидрометеониздат, 1984, 185 с.
15. Young K. C. A numerical simulation of wintertime, orographic precipitation: Part 1. Description of model microphysics and numerical techniques. J. Atmos. Sci., 1974, v. 31, p. 1735—1748.