

М.Ф. Хайрутдинов, В.И. Хворостьянов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО УМЕНЬШЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ ОРОГРАФИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ

Приведены результаты численного моделирования эволюции оптических и микрофизических характеристик орографической облачности нижнего яруса при периодическом самолетном засева твердой углекислотой для обеспечения астрономических наблюдений. Проведено сравнение микрофизических и оптических характеристик облачности до и после воздействия для различных вариантов засева. Даны рекомендации по методике рассеяния для минимизации оптической толщины облака в определенном диапазоне углов визирования.

1. Введение. Наблюдаемые в атмосфере орографические облака образуются под влиянием тех волновых движений, которые возникают при обтекании воздушным потоком гор и возвышенностей [1]. Астрономические обсерватории, а также пункты дистанционного зондирования атмосферы располагаются, как правило, на вершинах горных хребтов, что уменьшает замутняющее влияние атмосферы. Однако орографическая облачность может стать серьезной помехой для оптических наблюдений. В некоторый ответственный момент наблюдения, например, во время солнечного затмения, метеоусловия могут оказаться неблагоприятными из-за шапки облаков, возникающей за счет орографического подъема. Поэтому перед практикой встает проблема активного воздействия на эту облачность с целью ее рассеяния.

Основной помехой для оптических наблюдений является характерная облачная шапка, образующаяся непосредственно над хребтом. При орографическом подъеме по наветренному склону хребта воздушная масса охлаждается и, при достижении состояния насыщения, происходит процесс конденсации, т.е. образование облачных капель.

При спуске по подветренному склону хребта воздух нагревается, что приводит к состоянию недосыщения над водой, т.е. к испарению облачных капель. Таким образом, облачная шапка над горным хребтом представляет собой поток капель, непрерывно образующихся на наветренной границе облака и после переноса над хребтом испаряющихся на подветренной границе облака [1].

Облачные капли имеют размеры примерно 10 мкм. Естественно, что столь мелкие капли при больших концентрациях весьма сильно рассеивают свет, что делает невозможными оптические наблюдения. Таким образом, возникает задача рассеяния облачной шапки над хребтом, например, с помощью засева ее гранулированной твердой углекислотой с самолета.

В нашей стране получили распространение практические работы по рассеянию сплошной слоистообразной облачности на больших площадях с различными целями, в том числе и с целью обеспечения астрономических наблюдений. Например, в феврале 1961 г. было проведено успешное воздействие на двухслойную облачность над Крымом во время солнечного затмения [2]. Большое распространение получили также работы по искусственному увеличению осадков в горных районах, в том числе и из орографической облачности [1, 3]. Разрабатывались и математические модели процесса засева орографической облачности с целью получения искусственных осадков [4, 5].

Однако численных расчетов процесса искусственной кристаллизации облака с целью уменьшения его оптической толщины над вершиной хребта ранее не проводилось. Поэтому возникла необходимость создания математической модели искусственного рассеяния орографических облаков с целью выяснения основных закономерностей этого процесса, а также разработки на основе численного моделирования рекомендаций по практическому ведению этих работ.

В качестве метода активного воздействия на орографическое облако был выбран периодический засев хладореагентом с самолета. Периодичность засева, т.е. повторение его через равные промежутки времени, существенна из-за постоянной генерации облачных капель на наветренной границе облака.

В отличие от более ранней модели [4, 5], в которой скорость воздуха в натекающем потоке не менялась с высотой, в данной модели был разработан новый блок расчета динамики обтекания орографического препятствия, учитывающий сдвиг ветра с высотой, что существенно при моделировании самолетного засева углекислотой. Этот блок был апробирован при расчете зон повышенного аэрозольного рассеяния во внутренних гравитационных волнах в горных районах [6].

2. Формулировка модели. Для расчета поля скорости было использовано аналитическое решение задачи обтекания горного хребта стратифицированным по высоте потоком в линейном приближении,

предложенным в [7], т.к. в рассматриваемом нами случае тангенс угла наклона склонов хребта не превышает по модулю 1/25 и можно предположить, что возмущение метеоэлементов $|\varphi'| \ll |\varphi_0|$, где φ_0 — их фоновое значение в потоке.

Направим ось x вдоль по потоку, ось z — вертикально вверх. Приведем решение для смещения линий тока от уровня z для профиля хребта, заданного в виде

$$h(x) = \frac{a^2 b}{a^2 + (x - x_0)^2}, \quad (1)$$

где a — полуширина хребта; b — его высота относительно основания; x_0 — координата вершины:

$$\zeta(x, z) = \frac{U_0(0)}{U_0(z)} ab \exp\left\{\frac{g - R\gamma}{2RT_0} z\right\} \cdot \left[\frac{J_0(\beta e^{-\lambda z/2})}{J_0(\beta) ab} h(x) - \right. \\ \left. - \pi\lambda\theta(x - x_0) \sum_{n=1}^N \left(e^{-a\kappa} \sin[\kappa(x - x_0)] \frac{\sqrt{\kappa^2 - \alpha_1}}{K} \frac{J_\nu(\beta e^{-\lambda z/2})}{\frac{d}{d\nu} J_\nu(\beta)} \right)_{\kappa=\kappa_n} \right]. \quad (2)$$

Здесь $U_0(z)$, $T_0(z)$ — фоновые значения горизонтальной скорости и температуры; $\gamma = -\frac{dT_0}{dz}$; R — газовая постоянная для воздуха; $g = 9,81$ м/с²; $\beta = 2\sqrt{\frac{\alpha_0}{\lambda}}$; $\nu = \frac{2}{\lambda}\sqrt{\kappa^2 - \alpha_1}$; $J_0(x)$, $J_\nu(x)$ — функции Бесселя 1-го рода; K_n — корни уравнения $J_\nu(\beta) = 0$; N — их количество; $\theta(x)$ — функция Хевисайда; α_0 , α , λ — вспомогательные параметры, характеризующие натекающий поток (см. [7]).

Декартовы составляющие скорости выражаются через смещение ζ следующим образом:

$$w_d = u_0(z) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \Big/ \sqrt{1 - \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x}\right)^2}; \quad u_d = \sqrt{u_0^2(z) - w_d^2}. \quad (3)$$

Для расчета микрофизических процессов в облаках удобно перейти от декартовой к криволинейной системе координат:

$$x' = x, \quad z' = z - h(x). \quad (4)$$

Тогда кинетические уравнения для функции распределения по размерам капель f_1 и кристаллов f_2 совместно с уравнениями переноса температуры T и влажности q в криволинейной системе координат имеют вид (далее штрихи опущены) [4, 5, 8, 9]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{L_1}{C_p} \varepsilon_{c_1} + \frac{L_2}{C_p} \varepsilon_{c_2} + \frac{L_F}{C_p} \varepsilon_F - \gamma_a w_d + \Delta' T; \quad (5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} = -\varepsilon_{c_1} - \varepsilon_{c_2} + \Delta' q; \quad (6)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + (w - v_1(r_1)) \frac{\partial f_1}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r_1} \dot{r}_1 f_1 = \left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{\text{coll}} + J_{1a} + J_1 + \Delta' f_1; \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + (w - v_2(r_2)) \frac{\partial f_2}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r_2} \dot{r}_2 f_2 = \left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{\text{coll}} + J_2 + \Delta' f_2; \quad (8)$$

$$\dot{r}_i = \frac{D \Delta_i \rho_a K_f}{\rho_i r_i \Gamma_i \xi_i^2}; \quad \Gamma_i = 1 + \frac{L_i}{C_p} \frac{\partial q_{si}}{\partial T}; \quad \Delta' = \frac{\partial}{\partial x} \kappa_x \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \kappa_z \frac{\partial}{\partial z}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_{c_i} = 4\pi \rho_i \xi_i \int_0^\infty r_i^2 \dot{r}_i f_i dr_i; \quad \varepsilon_F = \frac{4}{3} \pi \rho_2 \xi_2 \int_0^\infty r_1^2 J_{1F}(r_1, T) dr_1, \quad (10)$$

где u , w — горизонтальные и вертикальные компоненты скорости в криволинейной системе координат, определяющиеся через декартовы компоненты скорости U_d , W_d :

$$u = u_d; \quad w = w_d - u_d \frac{dh}{dx}. \quad (11)$$

Индекс $i = 1$ относится к каплям, $i = 2$ — к кристаллам; κ_x , κ_z — коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии; \dot{r}_i — скорость роста отдельной капли или кристалла; $v_i(r_i)$ — скорость падения частиц; q_{si} — насыщающая влажность над водой и льдом; $\Delta_i = q - q_{si}$ — пересыщение; D — коэффициент молекулярной диффузии пара в воздухе; ρ_a , ρ_1 , ρ_2 — соответственно плотность воздуха, воды и льда; κ_f и ξ_i — фактор формы и соотношение характерных размеров частиц; ε_{ci} — скорость конденсации и сублимации водяного пара; ε_F — скорость замерзания капель; Γ_i — психрометрическая поправка; L_i — теплота испарения капель и кристаллов; L_F — теплота замерзания капель; C_p — удельная теплоемкость воздуха; $\left(\frac{\partial f_i}{\partial t}\right)_{\text{col}}$ — скорость изменения спектров капель и кристаллов за счет коагуляции и аккреции; J_1 и J_2 — описывают замерзание капель и зарождение кристаллов на естественных ядрах сублимации; J_{1a} — зарождение новых капель на атмосферных ядрах конденсации; $\gamma_a = \frac{g}{C_p}$.

Выражения для скорости падения капель и кристаллов задавались аналогично [8, 9, 10].

Выражения для J_i , J_{1a} в правой части уравнений (8), (9) параметризовались аналогично [8, 11].

По рассчитанным функциям распределения капель f_1 и кристаллов f_2 можно определить: водность q_{L1} , ледность q_{L2} , концентрацию капель N_1 и кристаллов N_2 и их средний радиус \bar{r}_i :

$$q_{L_i} = \frac{4}{3} \pi \rho_i \int_0^{\infty} r_i^3 f_i dr_i; \quad (12)$$

$$N_i = \int_0^{\infty} f_i dr_i, \quad (13)$$

$$\bar{r}_i = \frac{1}{N_i} \int_0^{\infty} r_i f_i dr_i. \quad (14)$$

Из оптических характеристик можно вычислить сечение рассеяния света облаком σ на единицу объема, а также оптическую толщину облака τ_i вдоль некоторого направления / [12, 13]:

$$\sigma = 2\pi \left[\int_0^{\infty} r_1^2 f_1 dr_1 + 2 \left(\int_0^{\infty} r_2^2 f_2 dr_2 \right) / \left(\frac{2,5}{\bar{r}_2} \left(\frac{6q_{L_2}}{\pi \rho_2 N_2} \right)^{1/3} - 3 \right) \right]; \quad (15)$$

$$\tau_i = \int_0^l \sigma dl. \quad (16)$$

Зная оптическую толщину τ_i , можно определить во сколько раз ослабляется интенсивность света при прохождении через облако из отношения: $I = I_0 e^{-\tau_i}$.

Засев с самолета твердой углекислотой моделировался введением в узлы разностной сетки по всей глубине линии засева кристаллов с концентрацией $P_{\text{кр}}[\text{дм}^{-3}]$ и размером r_c . Расход реагента на 1 км пролета самолета находится по формуле:

$$Q = \frac{P_{\text{кр}} \cdot \Delta x \cdot \Delta z_3}{N_{\text{CO}_2}} \cdot 10^9, \quad (17)$$

где Δx — шаг разностной сетки по оси x , км; Δz_3 — глубина засева, км; $N_{\text{CO}_2} = 10^{12}$ — количество кристаллов, образующихся при испарении 1 г CO_2 ; размерность Q в кг/км. Периодичность засева моделировалась повторением процедуры засева каждые 10 мин физического времени. Это соответствует времени периодического засева одним самолетом, выполняемого в полевых условиях при полете самолета по схеме типа «восьмерки».

Начальный этап численного решения системы уравнений включал в себя расчет декартовых компонент скорости потока с заданными профилями $U_0(z)$ и $T_0(z)$ при обтекании модельного хребта (1) по формулам (2)–(3). Следующий этап вычислений заключался в интегрировании уравнений микрофизики. Для этого вводилась конечноразностная сетка: 31 точка по вертикали с постоянным шагом Δz и 41 точка по горизонтали с постоянными шагом Δx .

При решении уравнений термогидродинамики и микрофизики применялся метод расщепления, развитый Г.И. Марчуком с сотрудниками [14]. На первом этапе расщепления рассчитывался горизонтальный перенос, на втором — вертикальный, на третьем рассчитывались процессы конденсации, сублимации и перегонки пара с капель на кристаллы, на четвертом заключительном этапе рассчитывались процессы коагуляции и аккреции. Более подробно метод расчета изложен в [8, 9, 13].

После расчета компонент скорости в криволинейной системе координат по формулам (И) задавались начальные поля T , q и f_i следующим образом. В начальный момент $f_i(x, z, r_i, t) = 0$ во всех точках сетки. Поля T и q — однородны по криволинейной координате x' . Температура задавалась в виде $T_0(z) = T_0(0) - \gamma z$, а профиль относительной влажности задавался экспоненциальным законом:

$$q_r(z) = q_{r0} \exp(-z/A_D), \quad (18)$$

хорошо описывающих в среднем поведение T и q в тропосфере.

3. Результаты расчетов. Область расчетов по оси x составила 40 км, с шагом разностной сетки 1 км, по оси z — 3 км, с шагом 0,1 км. Высота хребта $b = 0,6$, полуширина $a = 10$, $x_0 = 20$ км. Для исследования влияния на зону кристаллизации сдвига ветра с высотой задавался профиль скорости $U_0(z)$ (м/с) в виде: $U_0(z) = 5 + 1,43z$, где z — в км. Кроме того, использовался следующий набор параметров: $\gamma = -\frac{dT_0}{dz} = 6^\circ\text{C км}^{-1}$; $T_0(0) = -5^\circ\text{C}$; $\kappa_x = 50 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $\kappa_z = 5 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; $A_D = 8 \text{ км}$; $q_{r0} = 90\%$; $r_0 = 20 \text{ мкм}$. Шаг по времени $\Delta t = 60 \text{ с}$.

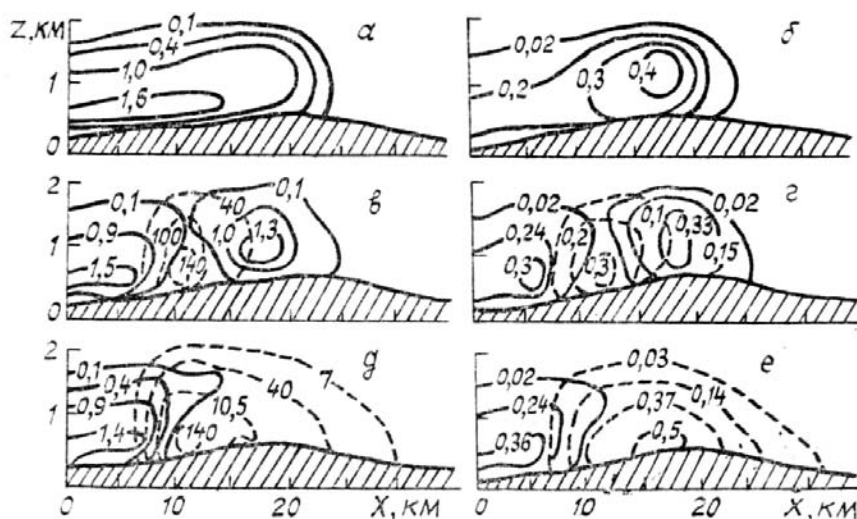


Рис. 1. Изолинии концентрации капель $N_1 \cdot 10^5 \text{ г}^{-1}$ (сплошные линии) и кристаллов $N_2, \text{ г}^{-1}$ (штриховые) (а, в, д); поля водности $q_L, \text{ г/кг}$ (сплошные линии) и ледности $q_{L2}, \text{ г/кг}$ (штриховые) (б, з, е); а, б — перед засева; в, з — через 20 мин после начала засева; д, е — через 50 мин

На рис. 1, а, б представлены поля водности и концентрации в образовавшемся облаке через полтора часа естественной эволюции. Водность облака достигает 0,4 г/кг. Кристаллическая фаза практически отсутствует, несмотря на значительное пересыщение надо льдом (20%). Это обусловлено малой вероятностью замерзания капель т.к. за сравнительно короткое время переноса капель через облако они не успевают вырасти до достаточно больших размеров. Кроме того, температура в облаке не падает ниже -25°C , что также понижает эффективность замерзания капель ($J_1 \sim \exp(237 - T)$). Ядра сублимации при таких температурах практически не активны. Водяные капли, образуясь на левой границе облака, прокачиваются через него, а затем, попадая в нисходящие потоки за вершиной хребта, диссипируют.

В таблице приведены варианты засева и для каждого варианта — значения вертикальной оптической толщины облака над вершиной хребта, количественно характеризующей атмосферную помеху при атмосферных наблюдениях. В численных экспериментах варьировались удаленность линии засева от вершины хребта и расход реагента. Глубина засева варьировалась незначительно. Периодичность засева была выбрана равной 10 мин, что близко к реальной периодичности засева, осуществляемого одним самолетом. Процесс кристаллизации облака наглядно иллюстрирует рис. 1, а–е (ва-

риант 1). Линия засева в этом варианте проложена за 13 км до вершины хребта. Расход реагента на один километр вдоль хребта составил 0,9 кг/км, глубина засева охватывает практически всю толщину облака. Через 20 мин после начала засева на расстоянии около 5 км по ветру от линии засева образуется характерный «провал» в капельной фазе (рис. 1, в, з). В центре зоны кристаллизации ледность достигает 0,3 г/кг. Зона кристаллизации неоднородна по вертикали и наклонена в подветренную сторону, что обусловлено влиянием сдвига ветра. Действительно, искусственные кристаллы, локализованные в верхних слоях облака за счет большей скорости переноса, пролетают расстояние большее, чем кристаллы внизу. За счет наличия большого пересыщения над льдом кристаллы быстро «растут», «поглощая» жидкую фазу, и падают вниз, выпадая на склонах хребта в виде снега. Через 50 мин после начала периодического засева облако справа от линии засева полностью кристаллизуется (рис. 1, д, е).

Т а б л и ц а

№ варианта	Удаление линии засева, км	$P_{кр}$, $дм^{-3}$	Расход реагента, Q кг/км	Верхняя граница линии засева, км	Нижняя граница линии засева, км	Вертикальная оптическая толщина над вершиной хребта
1	13	500	0,9	2,0	0,2	4,0
2	13	200	0,4	2,0	0,5	9,5
3	13	2000	1,4	1,7	1,0	8
4	16	500	0,75	2,0	0,5	3
5	16	1500	2,25	2,0	0,5	7,5
6	16	3000	4,5	1,7	0,2	12
7	8	500	0,75	1,7	0,2	5,5
8	5	1500	2,25	1,7	0,2	11,5

Сущность процесса рассеяния иллюстрирует рис. 2. До засева облако чисто капельное со средним радиусом в основной толще около 8 мкм с концентрацией капель до $1,4 \cdot 10^5 \text{ г}^{-1}$, с водностью, достигающей 0,38 г/кг. Оптическая толщина облака над хребтом равна 64.

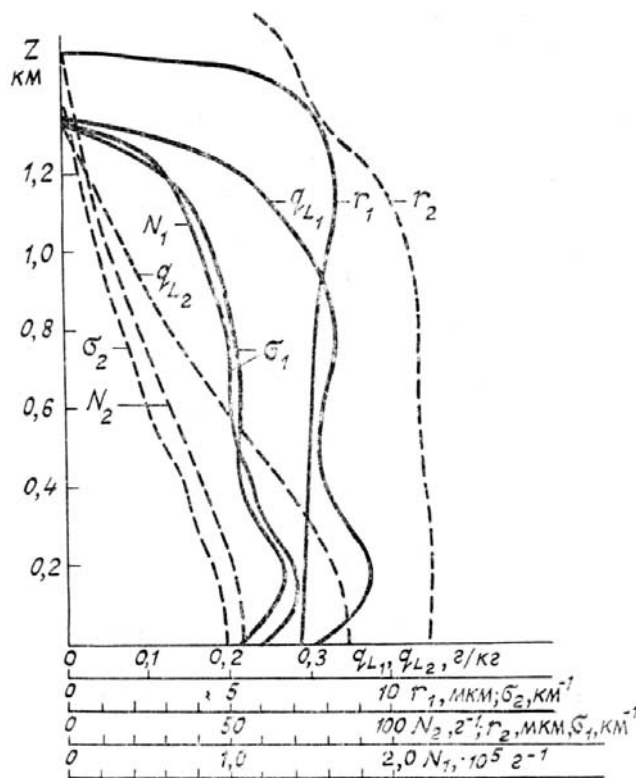


Рис. 2. Вертикальный разрез облачной «шапки» над вершиной хребта до засева (сплошные линии) и во время засева по варианту 4 (штриховые); N_1 , N_2 — концентрации капель и кристаллов, \bar{r}_1 , \bar{r}_2 — их средние радиусы; q_{L1} , q_{L2} — водность и ледность; σ_1 и σ_2 — сечения рассеяния

Интересно отметить, что профиль сечения рассеяния σ_1 практически повторяет профили N_1 и q_{L1} . После засева облако над вершиной хребта чисто кристаллическое со средним радиусом кристаллов около 120 мкм, концентрацией до 55 г^{-1} внизу облака и ледностью до $0,35 \text{ г/кг}$. Заметно, что профиль σ_2 опять практически повторяет профиль N_2 . Отсюда можно предположить, что на зависимость сечения рассеяния от высоты наибольшее влияние оказывает профиль концентрации. В рассматриваемом варианте 4 получена наименьшая величина вертикальной оптической толщины $\tau = 3$, что может оказаться достаточным для наблюдения, например, солнечного затмения. На рис. 3 представлены профили среднего радиуса кристаллов (сплошные линии) и их концентрации (пунктирные) для различных вариантов засева над вершиной хребта. Будем считать вариант 4 базовым и сравним с ним остальные варианты.

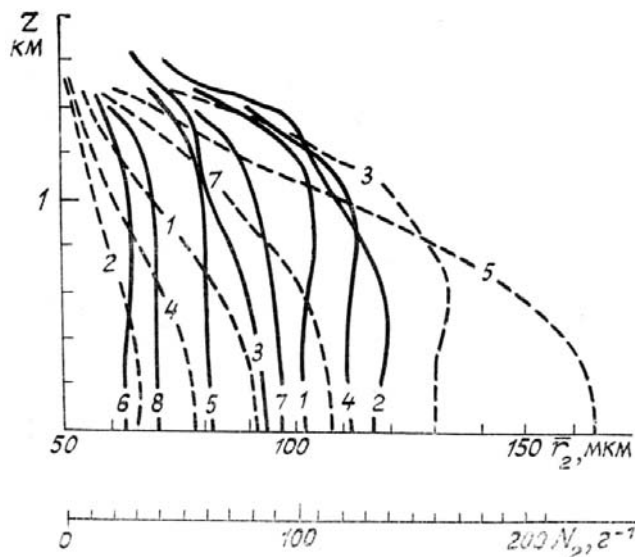


Рис. 3. Вертикальные разрезы облачной «шапки» над вершиной хребта для различных вариантов засева (см. таблицу); сплошные линии — средний радиус кристаллов \bar{r}_2 ; штриховые — их концентрация N_2

Рассмотрим вариант 5. Из рис. 3 следует, что в варианте 5 по сравнению с вариантом 4 произошел перезасев, т.к. средний радиус кристаллов при этом на 30 мкм меньше, хотя удаленность линии засева одинакова для обоих вариантов. Вследствие этого скорость падения кристаллов меньше, поэтому они не успевают в достаточном количестве выпасть из облака до вершины хребта. По этой причине оптическая толщина в варианте 5 составляет 7,5. То же относится и к варианту 6, для которого $\tau = 12$. Приближение линии засева к вершине ухудшает результат. Например, рассмотрим вариант 1. Более близкое к вершине расположение линии засева приводит к тому, что хотя расход реагента практически идентичен варианту 4, тем не менее концентрация кристаллов над вершиной оказывается большей, чем в варианте 4. Отсюда и увеличение τ до 4. Уменьшение расхода реагента не приводит к улучшению результата, что иллюстрирует вариант 2. Из рис. 3 следует, что в варианте 2 концентрация кристаллов уменьшилась по сравнению с вариантом 4, однако оптическая толщина $\tau = 9,5$. Это объясняется тем, что облако при засеве по варианту 2 кристаллизуется не полностью и над вершиной хребта еще много облачных капель, т.е. из-за незначительной концентрации вводимых в облако кристаллов не происходит полной перегонки пара с капель на кристаллы. Таким образом, существует строго определенная дозировка реагента для данного облака и при данном удалении линии засева, при которой эффект рассеяния максимален. Варианты 7 и 8 демонстрируют дальнейшее приближение линии засева к вершине хребта. Как и следовало ожидать, при этом получается отрицательный эффект рассеяния. Дело в том, что в этих вариантах кристаллы вследствие короткого промежутка времени переноса до вершины хребта не успевают в достаточной мере выпасть на наветренном склоне.

Наряду с изучением модификации вертикальной оптической толщины при различных вариантах засева исследовалось ее угловое распределение относительно вершины хребта. Предположим, что на вершине хребта находится оптическая система, которая может проводить дистанционное зондирование атмосферы в сканирующем режиме. По известному полю сечения рассеяния можно получить угловое распределение оптической толщины облака, и с его помощью выбрать оптимальный угол визирования. За основу был взят наиболее удачный вариант 4. Угловое распределение τ в облаке иллюстрирует рис. 4. Сплошная линия соответствует облаку до засева, пунктирная во время периодического засева (вариант 4). Обе кривые проведены в полярной системе координат, где по радиальной оси отложена оптическая толщина облака до засева (нижний ряд шкалы) и после засева (верхний ряд шкалы). По угловой шкале отложены углы визирования оптического прибора по отношению к горизонту. Например, до засева под углом 40° к горизонту оптическая толщина облака была равна 80, а после

засева уменьшилась до 5. Предположим теперь, что оптический прибор для наблюдения некоторого источника света, например Солнца во время затмения, воспринимает свет, если только его интенсивность при прохождении через облако падает не более чем в 100 раз, что соответствует оптической толщине 4,6. Тогда по нижней кривей рис. 4 можно определить, что наблюдение будет успешным, если только Солнце расположено в секторе углов между 50 и 120° по отношению к горизонту. В противном случае наблюдение сильно затрудняется. Интересно отметить, что наименьшая оптическая толщина наблюдается под углом около 80°, а не в вертикальном направлении, т.е. направление наибольшей прозрачности засеянного облака наклонено в подветренную сторону.

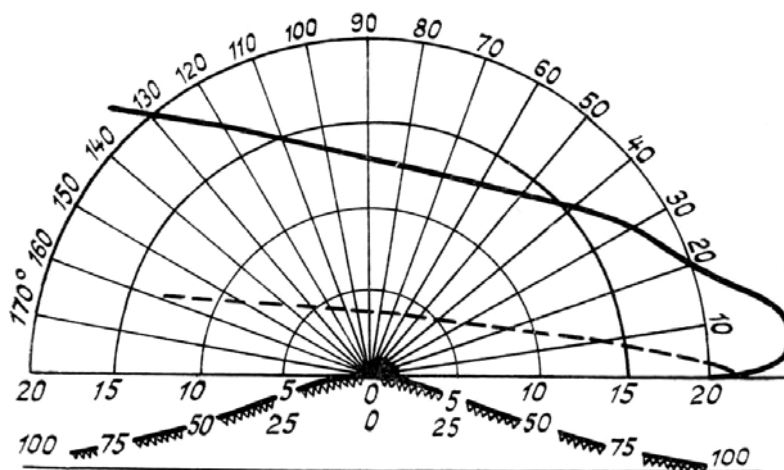


Рис. 4

4. Заключение. Сделаем основные выводы и рекомендации на основании численного моделирования искусственной кристаллизации облака с целью его рассеяния.

а). Линия засева облака, с одной стороны, должна располагаться достаточно далеко от вершины хребта с тем, чтобы образовавшиеся частицы осадков успели выпасть, по-возможности, на наветренном склоне хребта, но, с другой стороны, не столь далеко, чтобы избежать регенерации капельной фазы за счет орографического подъема.

б). Для выбранной удаленности линии засева существует оптимальная дозировка реагента; как перезасев, так и недозасев отрицательно влияют на конечный результат воздействия.

в). При положительном эффекте воздействия существует достаточно узкий сектор углов (несколько десятков градусов) с достаточно малой оптической толщиной; при этом направление наибольшей прозрачности наклонено в подветренную сторону.

г). Для поддержания окна прозрачности в квазистационарном состоянии необходим периодический засев; одиночный засев даст лишь кратковременный эффект из-за быстрой регенерации капельной фазы.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Р. Торояну за ценные замечания и обсуждения в ходе работы.

1. Деннис А. Изменение погоды засевом облаков. М.: Мир, 1983. 272 с.
2. Федоров Е. К. // Вестник АН СССР. 1962. № 9.
3. Седунов Ю. С. // Метеорология и гидрология. 1986. № 9. С. 5–17.
4. Кондратьев К. Я., Тороян Г. Р., Хворостьянов В. И. // Исследование Земли из космоса. 1988. № 1. С. 3–15.
5. Тороян Г. Р., Хворостьянов В. И. // Труды ЦАО. 1987. Вып. 164. С. 66–72.
6. Кондратьев К. Я., Хворостьянов В. И., Хайрутдинов М. Ф., Кудрявцев С. Ю. // Оптика атмосферы. 1990 (в печати).
7. Doos В. R. 33 Tellus. 1961. V. 13. № 3. P. 305.
8. Буйков М. В., Пирнач А. М. // Изв. АН СССР. ФАО. 1975. Т. 11. № 5. С. 469–480.
9. Коган Е. Л., Мазин И. П., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И. Численное моделирование облаков. М.: Гидрометеиздат, 1984. 165 с.
10. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 542 с.
11. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Хворостьянов В. И. Облака и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 512 с.
12. Ohtake T., Huffman P. J. // J. Appl. Meteorol. 1969. V. 8. № 4.
13. Хворостьянов В. И. // Метеорология и гидрология. 1987. № 4. С. 29–37.
14. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1973. 352 с.

M.F. Khairutdinov, V.I. Khvorostiyarov. **Mathematical Modeling of Artificial Reduction of the Optical Depth of Orographic Clouds.**

The paper presents some results of mathematical modeling of the evolution of optical and microphysical characteristics of the low level orographic clouds when seeded periodically with dry ice in order to provide the conditions for astronomical observations. Microphysical and optical parameters of the clouds observed before and after seeding are compared for different seeding techniques. Certain recommendations are given in the paper on how to seed the clouds to minimize their optical depth within a required viewing angles.