

УДК 551.5.001.57 + 551.501; 551.508

Б.А. Дорман, В.П. Баханов, А.А. Манжара

МИКРОФИЗИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРОНТАЛЬНЫХ СМЕШАННЫХ ОБЛАКОВ (РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

Приведены результаты численного моделирования микрофизических и оптических характеристик фронтальных смешанных облаков, содержащих кристаллы различных форм. Особое внимание уделено анализу зависимости оптической толщины облаков и облачной отражаемости (в видимой и ближней инфракрасной областях спектра солнечного излучения) от фазового состава облаков. Предложены предварительные критерии для разделения участков облачности с различным фазовым составом на основе измеренных значений облачной отражаемости в разных каналах спутникового радиометра.

Ключевые слова: фронтальные смешанные облака, численное моделирование, оптические характеристики облаков, разделение облаков по фазовому составу.

Введение

Статья посвящена численному моделированию эволюции смешанных фронтальных слоистообразных облаков с разным фазовым составом и содержащих кристаллы нескольких форм. Указанное моделирование основано на следующих численных моделях:

а) микрофизическая модель смешанного облака с тремя формами кристаллов (иглы, пластинки, столбики) [3, 1, 7];

б) алгоритмы расчета характеристик рассеяния и поглощения солнечного излучения для капель, основанные на теории Ми [4], и для кристаллов – на приближении геометрической оптики [10];

в) метод дискретных ординат (ДОМ) для решения уравнения переноса солнечной радиации в облачном слое и вычисления спутникового сигнала (отражаемости солнечной радиации CR) [9, 6, 13, 5].

Основное внимание в статье уделено результатам вычислений и анализу оптических характеристик смешанных слоистообразных облаков, в особенности, исследованию влияния микрофизики облаков на

оптическую толщину облака (COT) и отражаемость облачности (CR). Предложены критерии разделения участков облачности с различным фазовым составом по значениям облачной отражаемости и оптической толщины в видимой и ближней инфракрасной области спектра солнечного излучения. Результаты моделирования используются нами в решении обратной задачи восстановления оптической толщины облачности и эффективных размеров облачных частиц [5, 8, 2].

Краткое описание численных моделей

Микрофизическая модель

Нами используется разработанная ранее [3, 1, 7] одномерная нестационарная численная модель смешанного слоистообразного облака с детальной микрофизикой (в частности, учитывается наличие в облаке трех видов частиц льда: игл, пластинок, столбиков). Система уравнений, описывающая образование и эволюцию облака в тропосфере вследствие упорядоченных восходящих движений и трансформационных температурных изменений, состоит из уравнений переноса тепла и водяного пара, а также четырех кинетических уравнений для функций распределения капель и кристаллов по размерам $f_j(r_j, t, z)$, где r_j – характерный размер (радиус) капель ($j = 1$), игл ($j = 2$), пластинок ($j = 3$), столбиков ($j = 4$), t – время, z – высота. Характеристики форм частиц льда таковы: иглы и столбики моделировались сфероидами, большая полуось которых считалась характерным размером r_j ($j = 2; 4$). Пластинки моделировались тонкими цилиндрами с радиусом r_3 .

Параметры процессов зарождения капель и кристаллов, замерзания капель, седиментации и роста (испарения) облачных частиц, турбулентной диффузии, формы кристаллов подробно изложены в работе [2]. Здесь мы приведем только выражение для скорости зарождения кристаллов (в единице массы воздуха) вследствие активации ядер льдообразования:

$$I_j = \mu_j F_s(T) \left| \frac{dT}{dt} \right| \theta(\Delta_k) \theta\left(-\frac{dT}{dt}\right); \quad j = 2, 3, 4; \quad \kappa = 1, 2; \quad (1)$$

$$\theta(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0, \\ 1 & x > 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$F_s = A_s \exp[B_s(T_o - T)]. \quad (3)$$

В (1)-(3): T – температура; $T_0 = 0^\circ \text{C}$; $B_s = 0,2 (\text{C}^{-1})$; A_s – варьируемый параметр. Наличие функции скачка $\theta (\Delta_\kappa)$, $\kappa = 1,2$ позволяет моделировать активацию ядер льдообразования разной природы: $\kappa = 1$ соответствует ядрам, активирующимся при достижении пересыщения над водой ($\Delta_1 > 0$); $\kappa = 2$ соответствует ядрам, активирующимся при пересыщении надолгом ($\Delta_2 > 0$). Интервалы температур зарождения кристаллов разных форм таковы: для игл ($j = 2$) $-10^\circ \text{C} < T < -5^\circ \text{C}$; для пластинок ($j = 3$) $-25^\circ \text{C} < T < -10^\circ \text{C}$; столбиков ($j = 4$) $-10^\circ \text{C} < T < -5^\circ \text{C}$ и $T < -25^\circ \text{C}$. В этих интервалах соответствующие $\mu_j = 1$, а вне их $\mu_j = 0$. Поскольку доля игл в общей концентрации кристаллов ничтожно мала (менее 0,1 %), мы не будем обсуждать характеристики игл.

Вертикальная скорость воздуха $w(z)$ параметризуется в виде параболического профиля в интервале высот $z_1 < z < z_2$ с максимальным значением скорости восходящих движений w_m . С помощью данной микрофизической модели находятся функции распределения частиц по размерам во всех узлах сетки в разные моменты времени, а также все необходимые моменты функций распределения: концентрация частиц n_j , водность и ледность q_{Lj} , средние размеры облачных частиц r_j для $j = 1, 2, 3, 4$, интенсивность осадков (суммирование по всем видам частиц), а также оптические характеристики каждой фракции частиц в целом.

Расчет оптических характеристик облачных частиц

Расчет оптических характеристик капель и кристаллов проводился для длин волн солнечной радиации: $\lambda_1 = 0,55 \text{ мкм}$, $\lambda_2 = 0,78 \text{ мкм}$, $\lambda_3 = 1,6 \text{ мкм}$, $\lambda_4 = 3,6 \text{ мкм}$, соответствующих каналам радиометра AVHRR спутников серии NOAA. Использовались значения комплексных коэффициентов преломления для воды и льда, приведенные в работах [12, 14]. Вычислялись объемные коэффициенты рассеяния $\beta_s^{(j)}$; коэффициенты ослабления (экстинкции) $\beta_e^{(j)}$; индикатрисы рассеяния $P^{(j)}(\theta)$, где θ – угол рассеяния.

Указанные характеристики для полидисперсной системы частиц определенного вида находятся интегрированием по всем размерам. Например, если поперечное сечение рассеяния единичной капли радиуса r_1 равно $\bar{\sigma}_s(r_1)$:

$$\bar{\sigma}_s(r_1) = \pi r_1^2 K_s^{(1)}(r_1), \quad (4)$$

где $K_s^{(1)}(r_1)$ – безразмерный фактор рассеяния, то объемный коэффициент рассеяния системы капель $\beta_s^{(1)}$ равен:

$$\beta_s^{(1)} = \int_0^{\infty} \sigma_s(r_1) f(r_1) d r_1 = \pi k^{-3} \int_0^{\infty} x_1^2 K_s^{(1)}(x_1) f(x_1) dx_1, \quad (5)$$

где $k = (2\pi/\lambda)$ – волновое число, $x_1 = (2\pi r_1/\lambda)$ – безразмерный радиус капли, $f_1(x_1)$ – функция распределения капель по размерам, нормированная на объемную концентрацию капель. Аналогичные выражения имеют место и для объемных коэффициентов поглощения (абсорбции) $\beta_{ab}^{(1)}$ и ослабления (экстинкции) $\beta_e^{(1)} = \beta_s^{(1)} + \beta_{ab}^{(1)}$, только $K_s^{(1)}$ заменены соответственно на безразмерные коэффициенты $K_{ab}^{(1)}$ и $K_e^{(1)}$. Соответственно индикатриса рассеяния системы капель находится по формуле:

$$P^{(1)}(\text{Cos}\theta) = \frac{\pi k^{-3}}{\beta_s^{(1)}} \int_0^{\infty} x_1^2 K_s^{(1)}(x_1) f(x_1) p^{(1)}(x_1, \text{Cos}\theta) dx_1, \quad (6)$$

где $p^{(1)}(x_1, \text{Cos}\theta)$ – индикатриса рассеяния единичной капли размера x_1 . Расчеты оптических характеристик единичных облачных частиц $K_s^{(j)}(x_j)$, $K_e^{(j)}(x_j)$, $p^{(j)}(x_j, \text{Cos}\theta)$ основывались: для капель на теории Ми [4], а для кристаллов на приближении геометрической оптики [10], поскольку размеры кристаллов намного больше длины волны солнечной радиации.

Легко показать, что оптические характеристики смеси капель и кристаллов выражаются через характеристики отдельных компонент смеси следующим образом:

$$\beta_s = \sum_{j=1}^4 \beta_s^{(j)}, \quad (7)$$

$$\beta_e = \sum_{j=1}^4 \beta_e^{(j)}, \quad (8)$$

$$P = \frac{1}{\beta_s} \sum_{j=1}^4 \beta_s^{(j)} P^{(j)}. \quad (9)$$

Алгоритм вычисления облачной отражаемости солнечной радиации

Для моделирования отражаемости облаков CR был использован метод дискретных ординат (ДОМ) для решения уравнения переноса солнечной радиации в облачном слое [6, 13]. Мы пользовались двухпотокowym приближением, в котором в уравнение переноса входят только два параметра: альбедо однократного рассеяния $\tilde{\omega} = (\beta_s / \beta_e)$ и фактор асимметрии для смеси облачных частиц g :

$$g = \frac{1}{\beta_s} \sum_{j=1}^4 \beta_s^{(j)} g^{(j)}, \quad (10)$$

который с точностью до коэффициента $1/3$ равен первому коэффициенту в разложении индикатрисы рассеяния смеси облачных частиц в ряд по полиномам Лежандра [6]. В используемом приближении фактор асимметрии находится по формуле (11):

$$g = 0,5 \int_{-1}^{+1} P(\cos\theta) \cos\theta d\theta. \quad (11)$$

Изотропному рассеянию соответствует фактор асимметрии $g = 0$. При увеличении асимметрии индикатрисы рассеяния, то-есть большей её вытянутости вперёд, фактор $g > 0$ увеличивается.

Результаты расчёта микрофизических и оптических характеристик смешанных фронтальных облаков с различным фазовым составом

Значения варьируемых параметров и микрофизических характеристик

Рассмотрим результаты 8 вариантов расчетов, в которых варьировались:

а) тип ядер льдообразования (сорбционные ядра, активирующиеся при достижении пересыщения водяного пара над водой, и сублимационные ядра, активирующиеся при достижении пересыщения надо льдом);

б) высота верхней границы облачности z_2 (или температура верхней границы облачности T_{ct});

Таблица 1

Фазовый состав и микрофизические характеристики модельных облаков

Тип нуклеации	z_2 , км	A_s , $(\text{г}^\circ\text{C})^{-1}$	Капли		Пластинки		Столбики		ΣPR max, мм/ч	Фазовый состав, номер варианта
			LWC max, г/кг	n_1 max, см^{-3}	IWC ₃ max, г/кг	n_3 max, 10^{-2}см^{-3}	IWC ₄ max, г/кг	n_4 max, 10^{-2}см^{-3}		
сорбционный ($\Delta_1 > 0$)	5,7	0,015	0,12 (10ч)	114 (5ч)	0,05 (5ч)	0,5 (5ч)	0,12 (15ч)	0,7 (10ч)	0,43 (15ч)	Смешанное облако; № 1
	5,7	0,05	0,01 (3ч)	37,2 (3ч)	0,12 (5ч)	0,5 (5ч)	0,12 (15ч)	0,7 (5ч)	0,43 (10ч)	Преимущественно кристаллическое облако; преобладают столбики; № 6
	3,9	0,015	1,09 (20ч)	798 (20ч)	0,04 (15ч)	0,3 (15ч)	0,001 (20ч)	0,02 (20ч)	0,10 (15ч)	Преимущественно жидкокапельное облако; № 2
	3,9	0,05	0,29 (10ч)	328 (10ч)	0,13 (15ч)	0,9 (15ч)	0,01 (20ч)	0,07 (20ч)	0,30 (15ч)	Смешанное облако; № 5
сублимационный ($\Delta_2 > 0$)	5,7	0,015	--	--	0,07 (5ч)	0,6 (5ч)	0,15 (20ч)	3,1 (20ч)	0,46 (15ч)	Кристаллическое облако; преобладают столбики; № 3
	5,7	0,05	--	--	0,08 (5ч)	1,4 (10ч)	0,18 (20ч)	7,2 (20ч)	0,49 (10ч)	Кристаллическое облако; преобладают столбики; № 8
	3,9	0,015	0,82 (20ч)	730 (20ч)	0,08 (10ч)	0,8 (10ч)	0,004 (20ч)	0,05 (20ч)	0,16 (10ч)	Преимущественно жидкокапельное облако; № 7
	3,9	0,05	--	--	0,18 (5ч)	4,3 (15ч)	0,03 (20ч)	0,8 (20ч)	0,37 (10ч)	Кристаллическое облако; преобладают пластинки; № 4

в) параметр A_s в формуле (3), определяющий скорость нуклеации льда.

Во всех 8 вариантах значения $z_1 = 0,3$ км и $w_m = 5$ см/с были фиксированными, а z_2 принимало значение 5,7 км и 3,9 км (соответственно T_{ct} принимала значения -34° С и -23° С).

В табл. 1 приведены характерные значения варьируемых параметров и микрофизических характеристик: а) максимальные значения объемных концентраций частиц разной формы и моменты времени, в которые эти значения достигались; б) максимальные значения удельной водности (LWC) и ледности пластинок IWC_3 и столбиков IWC_4 ; в) максимальные значения суммарной интенсивности осадков j_m (за счет всех форм ледяных кристаллов).

Численное моделирование показывает, что динамическая структура фронта (особенно высота и мощность ячеек восходящих движений) определяет фазовый состав облака. Если температура верхней границы облачности $T_{ct} < -30^\circ$ С, то в большинстве случаев в модели образуются почти кристаллические облака с преимущественной кристаллической формой – столбиками. Для таких облаков характерна высокая эффективность осадкообразования. Если $T_{ct} > -25^\circ$ С, то чаще всего образуются преимущественно жидкокапельные облака, особенно если скорость нуклеации невелика ($A_s \leq 0,015(\text{г}^\circ \text{С})^{-1}$). В таких облаках образуется большой запас жидкокапельной влаги ($Q_{Ll} \sim 1$ мм и более).

Пример эволюции смешанного облака

Для облегчения анализа результатов моделирования предварительно рассмотрим более подробно эволюцию смешанного облака (вариант № 1).

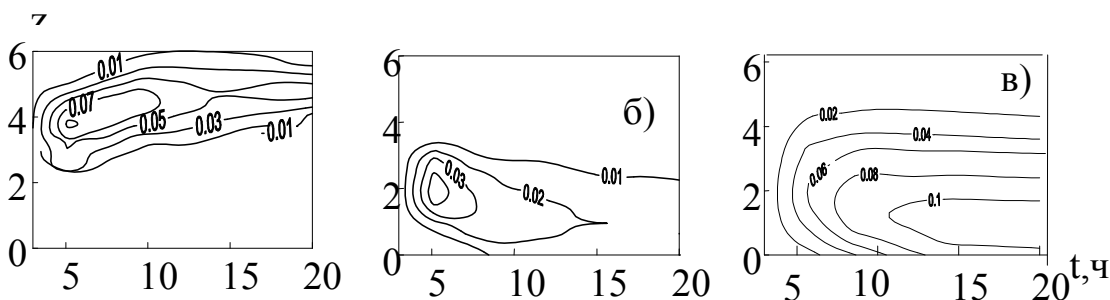


Рис. 1. Эволюция водности и ледностей в смешанном облаке: а) – LWC, б) – IWC_3 , в) – IWC_4 (все в г/кг)

В указанном варианте $z_1 = 0,3$ км, $z_2 = 5,7$ км (соответственно температура при $z_2 = 5,7$ км равнялась $T_{ct} = -34^\circ \text{C}$), $w_m = 5$ см/сек.

На рис. 1 представлены пространственно-временные разрезы удельной жидкокапельной водности LWC, ледности пластинок IWC₃ и столбиков IWC₄. Видно, что через 3-5 часов эволюции образуется мощное смешанное облако с максимальным значением водности более 0,1 г/кг. В дальнейшем процесс кристаллизации приводит к резкому уменьшению водности и увеличению ледности (особенно столбиков, $IWC_4 > 0,1$ г/кг при $t > 10$ ч).

Средние размеры пластинок быстро достигают величины 200-400 мкм, столбиков – 100-200 мкм. После $t = 7$ ч эволюции процесс образования осадков стабилизируется, интенсивность осадков достигает значения $j_m = 0,45$ мм/ч (учитывается сумма вкладов всех кристаллических форм).

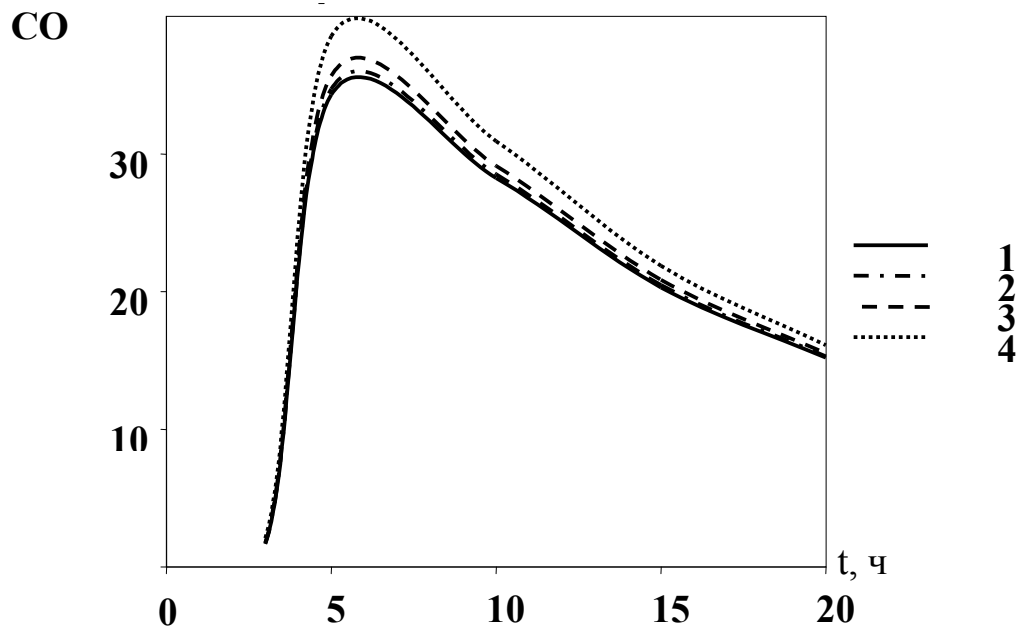


Рис. 2. Зависимость интегральной оптической толщины смешанного облака от времени эволюции

1 – 0,55 мкм; 2 – 0,78 мкм; 3 – 1,60 мкм; 4 – 3,60 мкм

На рис. 2 приведены зависимости от времени эволюции оптической толщины облака (COT):

$$COT(t) = \int_{z_1}^{z_2} \beta_e(z, t) dz . \quad (12)$$

В выражении для СОР значения коэффициента ослабления интегрируются по всей толщине облака. СОР сначала увеличивается до значений 35-38 (при $t = 5-7$ ч), основной вклад в оптическую толщину даёт жидкокапельная фракция. Потом СОР уменьшается до значений ~ 15 в результате кристаллизации и существенного уменьшения водности. На рис. 3 приведены результаты расчёта облачной отражаемости CR. CR в канале $\lambda = 0,55$ мкм изменяется синхронно с СОР, в то время как в канале $\lambda_4 = 3,6$ мкм сигнал почти не зависит от оптической толщины облака.

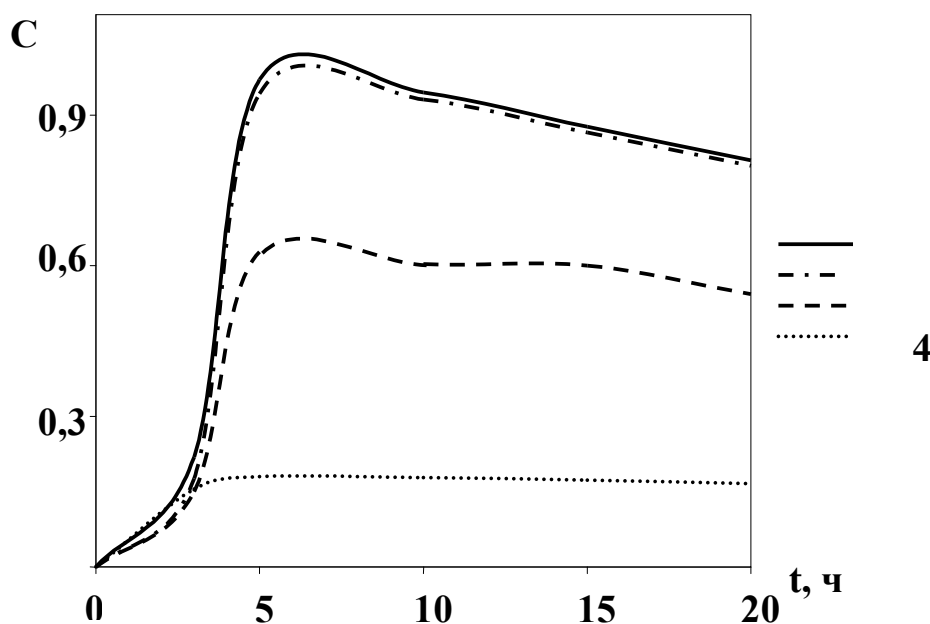


Рис. 3. Отражаемость от смешанного облака (сигнал спутника, рассчитанный по данным модели)

1 – 0,55 мкм; 2 – 0,78 мкм; 3 – 1,60 мкм; 4 – 3,60 мкм

Диапазоны значений оптической толщины и облачной отражаемости в облаках с разным фазовым составом

В табл. 2 варианты счета распределены по трем градациям в зависимости от значения параметра R:

$$R = \frac{q_{L1,m}}{q_{L3,m} + q_{L4,m}}, \quad (13)$$

где R – отношение максимальной водности к сумме максимальных ледностей пластинок $q_{L3,m}$ и столбиков $q_{L4,m}$ в момент эволюции $t = 15$ ч.

Градации выбираются по таким критериям: $R > 10$ – преимущественно жидкокапельные облака (I градация); $10 > R > 1$ – смешанные облака (II градация); $R < 0,1$ – почти чисто кристаллические облака (III градация).

В табл. 2 приведены также значения водозапаса Q_{LI} при $t = 15$ ч и установившиеся (максимальные) интенсивности осадков (при $t > 7 \dots 10$ ч) j_m , обусловленные вкладами всех кристаллических форм. Из табл. 2 следует, что при $T_{ct} = -34^\circ \text{C}$ образуются смешанные и в большинстве случаев – почти чисто кристаллические облака, дающие значительные осадки; жидкокапельные облака при таких значениях T_{ct} не образуются.

Таблица 2

Диапазоны микрофизических и оптических характеристик для смешанных облаков с разным фазовым составом

Z_2 , км	T_{ct} , °C	Преимущественно жидкокапельные облака, $R > 10$	Смешанные облака, $10 > R > 0,1$	Преимущественно кристаллические облака, $R < 0,1$
5,7	-34		Вариант № 1 $R = 0,6$ $Q_{LI} = 0,07 \text{ мм}$ $j_m = 0,43 \text{ мм/ч}$ $CR(\lambda_1) = 0,81-0,97$ $COT(\lambda_1) = 15-35$ $CR(\lambda_3) = 0,54-0,63$ $COT(\lambda_3) = 15-36$	Варианты №№3, 6, 8 $R = 0-0,02$ $Q_{LI} = 0,02 \text{ мм}$ $j_m = 0,43-0,49 \text{ мм/ч}$ $CR(\lambda_1) = 0,61-0,79$ $COT(\lambda_1) = 9-26$ $CR(\lambda_3) = 0,33-0,61$ $COT(\lambda_3) = 9-26$
3,9	-23	Варианты №№2,7 $R = 40-100$ $Q_{LI} = 0,9-1,5 \text{ мм}$ $j_m = 0,10-0,16 \text{ мм/ч}$ $CR(\lambda_1) = 0,98-1,0$ $COT(\lambda_1) = 40-200$ и более $CR(\lambda_3) = 0,61-0,66$ $COT(\lambda_3) = 48-200$ и более	Вариант № 5 $R = 2,4$ $Q_{LI} = 0,21 \text{ мм}$ $j_m = 0,30 \text{ мм/ч}$ $CR(\lambda_1) = 0,79-0,84$ $COT(\lambda_1) = 37-65$ $CR(\lambda_3) = 0,30-0,32$ $COT(\lambda_3) = 38-57$	Вариант № 4 $R = 0$ $Q_{LI} = 0$ $j_m = 0,43 \text{ мм/ч}$ $CR(\lambda_1) = 0,84-0,90$ $COT(\lambda_1) = 30-45$ $CR(\lambda_3) = 0,27-0,32$ $COT(\lambda_3) = 30-45$

В вариантах с $T_{ct} = -23^\circ \text{C}$, в зависимости от активности льдообразующих ядер (значения параметра A_s) могут образовываться все три градации облаков, причем преимущественно кристаллические облака состоят в основном из кристаллов пластинчатых форм.

Поскольку оптическая толщина облака СОР и облачная отражаемость в каждом варианте зависит от длины волны солнечной радиации и времени эволюции облака, мы приводим в табл. 2 максимальные диапазоны значений СОР и СР в каждой градации для времен $t = 5 \dots 20$ ч и $\lambda_1 = 0,55$ мкм, $\lambda_3 = 1,6$ мкм.

Из табл. 2 видно, что для облаков с высокой верхней границей первая градация отсутствует, диапазоны СР(λ_1) для второй и третьей градаций не перекрываются, а диапазоны СОР(λ_1) перекрываются значительно. В целом же смешанные и кристаллические облака имеют небольшие значения оптической толщины СОР(λ_1) = 9-35. Диапазоны СР и СОР для $\lambda_3 = 1,6$ мкм перекрываются для второй и третьей градаций.

В случае низкой верхней границы облачности встречаются, как уже было сказано, все три градации, причем для $\lambda_1 = 0,55$ мкм (диапазоны СР(λ_1)) не перекрываются для всех трех градаций, в то время как СОР(λ_1) перекрываются, хотя в целом почти жидкокапельные облака могут иметь весьма большие оптические толщины, гораздо больше, чем 65-70. Для $\lambda_3 = 1,6$ мкм имеется большой разрыв между диапазонами СР(λ_3) для 1-ой и (2+3)-ей градаций. Диапазоны СОР(λ_3) для 1-ой и (2+3)-ей градаций перекрываются гораздо слабее, чем в случае $\lambda_1 = 0,55$ мкм.

Проведенное исследование показывает, что возможно разделение областей жидкокапельной облачности и преимущественно кристаллической облачности по значениям СР(λ_1) и СР(λ_3).

Независимость оптической толщины облачности от длины волны для чисто кристаллических облаков

Характерной особенностью оптических свойств кристаллических облаков является независимость безразмерного фактора экстинкции $K_e = (\bar{b}_e/\pi r^2)$ от размеров кристалла, а также от длины волны.

Проиллюстрируем это табл. 3, в которой приведены результаты расчетов сечений экстинкции, рассеяния, поглощения (\bar{b}_e , \bar{b}_s , \bar{b}_{ab}) для

единичных пластинчатых кристаллов (в приближении геометрической оптики).

Ясно, что оптические толщины чисто кристаллических облаков не будут зависеть от длины волны солнечного излучения, и зависимость СОР от λ для преимущественно кристаллических облаков будет определяться только наличием жидкой фазы.

Анализ расчетов отношений $\text{COT}(\lambda_3) / \text{COT}(\lambda_1)$, где $\lambda_3 = 1,6$ мкм, $\lambda_1 = 0,55$ мкм показывает, что:

а) для преимущественно жидкокапельных облаков:
 $(\text{COT}(\lambda_3) / \text{COT}(\lambda_1)) \geq 1,04$;

б) для смешанных облаков: $1,04 > (\text{COT}(\lambda_3) / \text{COT}(\lambda_1)) \geq 1,01$;

в) $1,01 > (\text{COT}(\lambda_3) / \text{COT}(\lambda_1)) \geq 1$.

Таблица 3

Эффективные сечения экстинкции, рассеяния, поглощения и безразмерные факторы экстинкции для единичных пластинчатых кристаллов

λ , мкм	r , мкм	\bar{b}_e , 10^5 мкм^2	$K_e = \frac{\sigma_e}{\pi r^2}$	\bar{b}_s , 10^5 мкм^2	\bar{b}_{ab} , 10^5 мкм^2
0,55	196,2	1,34	1,11	1,34	0
1,6	196,2	1,35	1,12	1,30	0,05
3,6	196,2	1,34	1,11	1,12	0,22
3,6	88,9	0,28	1,12	0,26	0,02
3,6	133,0	0,62	1,11	0,54	0,08
3,6	175,4	1,08	1,11	0,91	0,17
3,6	237,2	1,97	1,11	1,60	0,37
3,6	320,8	3,60	1,11	2,81	0,79
3,6	700,0	17,08	1,11	12,63	4,45
3,6	1000,0	34,99	1,11	25,97	9,02

Таким образом, эти отношения также могут быть полезными как критерии разделения облаков по их фазовому составу. При этом нужно иметь в виду, что непосредственно СОР облачности не измеряется, а процедура восстановления СОР по экспериментальным значениям отражаемости CR в разных каналах связана с параллельным восстановлением эффективного радиуса облачных частиц r_{eff} [11].

Последний параметр является гораздо более чувствительным к фазовому составу, т. к. r_{eff} в жидкокапельных облаках порядка нескольких микрон-десятка микрон, в то время как в кристаллических облаках r_{eff} равен сотням микрон.

Характерные значения фактора асимметрии g и альbedo однократного рассеяния $\tilde{\omega}$ для капель и кристаллов

В табл. 4 приведены диапазоны средних значений модальных радиусов облачных частиц r_m , фактора асимметрии g и альbedo однократного рассеяния $\tilde{\omega}$, вычисленные на трех уровнях (высотах) облачности, где преимущественно был представлен один тип частиц. Напомним, что $\lambda_1 = 0,55$ мкм, $\lambda_3 = 1,6$ мкм, $\lambda_4 = 3,6$ мкм. Тенденция к убыли $\tilde{\omega}$ с ростом λ объясняется ростом поглощения (ростом мнимой части показателя преломления воды и льда).

Таблица 4

Характерные величины модальных радиусов r_m , факторов асимметрии g и альbedo однократного рассеяния капель и кристаллов

Типы частиц	r_m , мкм	λ , мкм	G	$\tilde{\omega}$
Капли	5,1 – 5,7	0,55	0,46 – 0,47	1
		1,6	0,74 – 0,75	0,99
		3,6	0,68	0,85 – 0,86
Пластинки	190 – 470	0,55	0,74 – 0,78	1
		1,6	0,78 – 0,81	0,93 – 0,96
		3,6	0,88 – 0,89	0,75 – 0,82
Столбики	79 – 130	0,55	0,68 – 0,72	1
		1,6	0,70 – 0,74	0,97 – 0,99
		3,6	0,76 – 0,82	0,83 – 0,93

Из табл. 4 видно, что фактор асимметрии для пластинок существенно выше, чем фактор асимметрии для капель (например, для $\lambda_1 = 0,55$ мкм g для пластинок на ~ 60 % больше, чем g для капель). Для столбиков также g для λ_1 больше, чем g для капель, на ~ 40 %. Для $\lambda = 3,6$ мкм альbedo однократного рассеяния для пластинок составляет 80 % от альbedo для

капель, для столбиков 95 %. Таким образом, кристаллы сильнее поглощают, чем капли. Кроме того, пластинки имеют очень вытянутые вперед индикатрисы. В целом это ослабляет отраженный от облачного слоя сигнал.

Выводы

1. По ранее разработанной авторами модели проведено последовательное численное моделирование микрофизических и оптических свойств смешанного слоистообразного облака, в котором зарождаются одновременно кристаллы нескольких форм. Особое внимание уделено анализу таких оптических характеристик как оптическая толщина облаков СОТ и облачная отражаемость CR солнечной радиации в видимой и близкой инфракрасной области спектра.

2. Моделирование зависимости оптических характеристик слоистообразных облаков от фазового состава показало:

а) в случае мощных облаков с высокой ($T_{ct} = -34^\circ \text{C}$) верхней границей преимущественно жидко-капельные облака практически не образуются, а образуются только смешанные и преимущественно кристаллические облака. Значения отражаемости для этих последних двух градаций (как для λ_1 , так и для λ_3) не перекрываются, а значения СОТ перекрываются значительно. В целом в таких облаках значения СОТ невелики (диапазоны значений 9-35);

б) в случае облаков с относительно низкой ($T_{ct} = -23^\circ \text{C}$) верхней границей могут образовываться облака всех трех градаций (почти жидкокапельные, смешанные, почти чисто кристаллические). При этом жидкокапельные облака могут иметь очень большую оптическую толщину (до 200 и более). В этом случае диапазоны отражаемости CR также не перекрываются для разных градаций, причем особенно большой разрыв в значениях отражаемости (при $\lambda_3 = 1,6 \text{ мкм}$) имеется между градацией почти жидкокапельных облаков и суммой градаций смешанных и почти кристаллических облаков.

3. Результаты моделирования отношений $(\text{СОТ}(\lambda_3) / \text{СОТ}(\lambda_1))$ показывают, что:

а) для преимущественно жидкокапельных облаков:
 $(\text{СОТ}(\lambda_3) / \text{СОТ}(\lambda_1)) \geq 1,04$;

б) для смешанных облаков: $1,04 > (\text{СОТ}(\lambda_3) / \text{СОТ}(\lambda_1)) \geq 1,01$;

в) для почти чисто кристаллических облаков:
 $1,01 > (\text{COT}(\lambda_3) / \text{COT}(\lambda_1)) \geq 1.$

4. Приведенные результаты могут быть полезными как критерии разделения фронтальных облаков по их фазовому составу.

* *

1. *Баханов В.П., Дорман Б.А.* Естественное и искусственное осадкообразование во фронтальных слоистообразных облаках, содержащих кристаллы различных форм // Тр. УкрНИГМИ. – 1992. – Вып. 243. – С. 8-23.
2. *Баханов В.П., Кривобок А.А., Дорман Б.А.* Восстановление микрофизических и оптических характеристик смешанных фронтальных облаков на основе радиометрических спутниковых данных // Вопросы физики облаков (Сб. ст. памяти С.М. Шметера). – М.: ГУ НИЦ Планета, 2008. – С. 35-57.
3. *Буйков М.В., Дорман Б.А.* Влияние трансформации формы кристаллов на спектр частиц осадков // Тр. УкрНИГМИ. – 1987. – Вып. 238. – С. 42-50.
4. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 165 с.
5. *Дорман Б.А., Кривобок А.А., Баханов В.П.* Влияние микроструктуры слоистообразных облаков на формирование сигнала спутникового радиометра // Тр. УкрНИГМИ. – 2004. – Вып. 253. – С. 59-71.
6. *Ку-Нан Лиоу.* Основы радиационных процессов в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 278 с.
7. *Bakhanov V.P., Dorman B.A.* Precipitation formation in winter stratiform clouds with several crystal forms // Proc. of the 12-th Conf. in Clouds and Precipitation (Zurich). – 1996. – P. 846-649.
8. *Bakhanov V., Kryvobok O., Dorman B.* Numerical simulation of frontal mixed cloud systems and cloud microstructure effect on satellite signal // Proc of the 2004 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference (Prague). – 2004. – P. 301-306.
9. *Liou K.-N.* A numerical experiment on Chandrasekar's discrete – ordinate method for radiative transfer. Application to cloudy and hazy atmosphere // J. Atmos. Sci. – 1973. – Vol. 30. – P. 1303-1326.
10. *Macke A., Mueller J., Rashke E.* Single scattering properties of atmospheric ice crystals // J. Atmos. Sci. – 1996. – Vol. 53. – P. 2813-2825.
11. *Nakajima T.Y., King M.D.* Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part 1. Theory // J. Atmos. Sci. – 1990. – Vol. 47. – P. 1878-1893.

12. *Segelstein D.* The complex refractive index of water (M.S.Thesis). – University of Missouri-Kansas City.
13. *Stamnes K., Dale H.* A new look at discrete – ordinate method for radiative transfer calculation in anisotropically scattering atmosphere. Part 2 Intensity computations // *J. Atmos. Sci.* – 1981. – Vol. 38. – P. 2696-2706.
14. *Warren S.G.* Optical constants of ice from ultraviolet to microwave // *J. Appl. Optics.* – 1984. – Vol. 23. – P. 1206-1225.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*

Б.А. Дорман, В.П. Баханов, О.Я. Манжара

Мікрофізичні та оптичні характеристики фронтальних змішаних хмар (результати чисельного моделювання)

Наведено результати чисельного моделювання мікрофізичних та оптичних характеристик фронтальних змішаних хмар, що містять кристали різних форм. Особливу увагу приділено аналізу залежності оптичної товщини хмари та хмарної відбиваності (в видимій та близькій інфрачервоній ділянках спектру сонячного випромінювання) від фазового складу хмар. Запропоновано попередні критерії для розділення ділянок хмарності з різним фазовим складом на основі вимірюваних значень хмарної відбиваності в різних каналах супутникового радіометра.

Ключові слова: фронтальні змішані хмари, чисельне моделювання, оптичні характеристики хмар, розподіл хмар по фазовому складу.

B.A. Dorman, B.P. Bakhanov, O.Ya. Manzhara

Microphysical and optical characteristics of frontal mixed clouds (results of numerical simulation)

The paper is devoted to the numerical simulation of microphysical and optical characteristics of frontal mixed clouds with several crystal forms. The main attention is devoted to the analysis of the dependence of the cloud reflectance (CR) and cloud optical thickness (COT) on the phase composition of clouds. The preliminary criteria for the separation of clouds with different phase composition are proposed (these criteria are based on CR values in different spectral channels of satellite radiometers).

Keywords: the frontal mixed clouds, modeling, the optical characteristics of the clouds, separation of clouds on phase structure.