

УДК УДК 551.5.001.57 + 551.501; 551.508

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

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ СЛОИСТЫХ ОБЛАКОВ

Приведены результаты численного моделирования микрофизических и оптических характеристик фронтальных смешанных, слоистообразных облаков небольшой мощности (тонких облаков с толщиной менее 0,9 км). Особое внимание уделено анализу зависимости оптической толщины облаков и облачной отражаемости (в спутниковых радиометрических каналах с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм и  $\lambda = 1,6$  мкм) от фазового состава облаков. Тонкие облака характеризуются малыми значениями оптической толщины  $COT < 10-15$ , а также малыми значениями облачной отражаемости  $CR < 0,4$  для  $\lambda = 1,6$  мкм и  $CR < 0,66$  для  $\lambda = 0,6$  мкм, что согласуется с данными спутниковых радиометрических измерений.

**Ключевые слова:** микрофизическая модель смешанных слоистообразных облаков, оптическая толщина и отражаемость солнечного излучения тонких облаков, результаты моделирования, спутниковые данные.

### Введение

В предыдущих работах [1, 2, 5, 6, 9], посвященных численному моделированию эволюции смешанных фронтальных слоистообразных облаков с разным фазовым составом, содержащих кристаллы нескольких форм, мы исследовали влияние микрофизики облаков на оптические характеристики, главным образом, на оптическую толщину облака (COT) и облачную отражаемость (CR) солнечной радиации (или спутникового сигнала).

Указанное моделирование основывалось на следующих численных моделях:

а) микрофизическая модель смешанного облака с несколькими формами ледяных кристаллов (иглы, пластинки, столбики) [1, 3, 8];

б) алгоритмы расчёта характеристик рассеяния и поглощения солнечного излучения для капель, основанные на теории Ми [4], и для кристаллов – на приближении геометрической оптики [11];

в) метод дискретных ординат (ДОМ) для решения уравнения переноса солнечной радиации в облачном слое и вычисления спутникового сигнала CR [5, 7, 10, 12].

Расчёты велись для длин волн солнечной радиации: 0,6 мкм и 1,6 мкм, соответствующих каналам радиометров спутников NOAA и MSG.

В указанных предыдущих исследованиях [2, 5, 6] мы моделировали весьма мощные слоистообразные облака, толщиной 3–4 км. Фазовый состав облаков характеризуется параметром  $k$ :

$$k = \frac{LWC_m}{IWC_{p,m} + IWC_{c,m}}, \quad (1)$$

где  $LWC_m$  – максимальная жидкокапельная водность,  $IWC_{p,m}$ ,  $IWC_{c,m}$  – максимальные ледности для кристаллов пластинчатых и столбчатых форм. Поскольку доля игл в общей концентрации кристаллов ничтожно мала, характеристики игл не принимались во внимание. По фазовому составу облака подразделялись на почти чисто жидкокапельные ( $k > 10$ ), смешанные ( $10 > k > 0,1$ ) и почти чисто кристаллические ( $k < 0,1$ ).

Исследования показали, что при температуре верхней границы облачности  $STT < -30$  °C почти жидкокапельные облака не образуются, а смешанные и кристаллические облака имеют значения COT в диапазоне 9–35, а значения CR в диапазоне 0,6–0,97 при  $\lambda = 0,6$  мкм и 0,33–0,61 при  $\lambda = 1,6$  мкм.

При  $STT > -30$  °C образуются все три градации облаков, причем почти чисто жидкокапельные облака имеют весьма высокие значения оптической толщины  $COT = 100-200$  и более, а значения CR, близкие к 1 для  $\lambda = 0,6$  мкм,  $CR = 0,61-0,66$  для  $\lambda = 1,6$  мкм. Значения облачной отражаемости CR для смешанных и кристаллических облаков всегда больше, чем 0,79 для  $\lambda = 0,6$  мкм, и больше, чем 0,27–0,30 для  $\lambda = 1,6$  мкм.

В табл. 1 приведены диапазоны значений  $STT$  и  $CR$  для толстых слоистообразных облаков, исследованных в [2, 5, 6]. Варианты расчётов

Таблиця 1

Диапазоны COT и CR для мощных (толстых) облаков

Параметры нуклеации	Код варианта	$\lambda=0,6$ мкм		$\lambda=1,6$ мкм	
		COT	CR	COT	CR
СТТ<-30°C, сорб	A11, A12	8,7-28,2	0,61-0,95	8,7-29,2	0,33-0,60
СТТ<-30°C, субли	B11, B12	14,8-25,7	0,72-0,79	14,8-25,7	0,42-0,61
СТТ>-30°C, сорб	A21, A22	54,3-406,8	0,84-1,00	56,7-429,6	0,32-0,97
СТТ>-30°C, субли	B21, B22	36,3-314,8	0,94-0,97	36,3-333,0	0,30-0,66

разделены по типам нуклеации (сорбционный, при котором ядра льдообразования активируются при достижении пересыщения над водой, и сублимационный, при котором ядра льдообразования активируются при достижении пересыщения надо льдом).

**Сравнение с экспериментальными значениями облачной отражаемости**

В данном разделе статьи проведем сравнение диапазонов модельных (расчетных) значений спутникового сигнала CR с данными экспериментальных измерений облачной отражаемости с помощью пассивных радиометров AVHRR спутника NOAA-12.

Рассмотрим конкретный пример изображений, полученных радиометром AVHRR 28.12. 2002 г. в 09:46 GMT. На северную и северо-западную часть Украины распространялось влияние циклона, движущегося с северо-запада. Значительные осадки 28.12.2002 г. наблюдались в Западной Украине (в Ужгороде – 13,4 мм за 14 часов) и Северо-востоке Украины в Черни-

говской области (в Семеновке – 10,4 мм за 14 часов). Для обработки были выбраны два снимка в момент времени 09:46 GMT (рис. 1 для канала  $\lambda = 0,6$  мкм; рис. 2 – для канала  $\lambda = 1,6$  мкм).

На рис. 1 видно, что в областях СТТ < -30 °C имеются достаточно большие площади, соответствующие небольшим значениям CR < 0,6. Например, большая территория расположена у верхнего (северного) обреза снимка (западнее и северо-западнее Киевского водохранилища). На рис. 2 (для  $\lambda = 1,6$  мкм) соответствующая площадь (западнее Киевского водохранилища) с небольшими значениями CR < 0,25 (то же для СТТ < -30 °C) видна более четко.

Несоответствие данных численного моделирования и экспериментальных данных, возможно, обусловлено наличием достаточно тонких облаков (толщиной менее 1 км).

Проверке этого предположения и моделированию оптических характеристик тонких слоистообразных смешанных облаков посвящена данная статья.

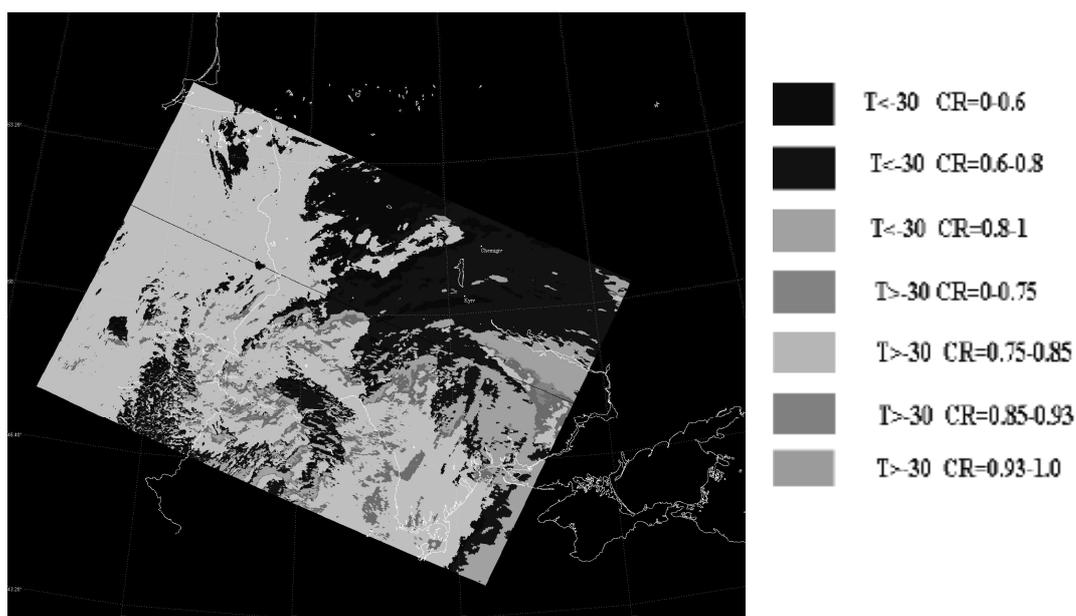


Рис. 1. Измеренные значения CR в канале 0,6 мкм 29. 12. 2002 г., 09:46 GMT)

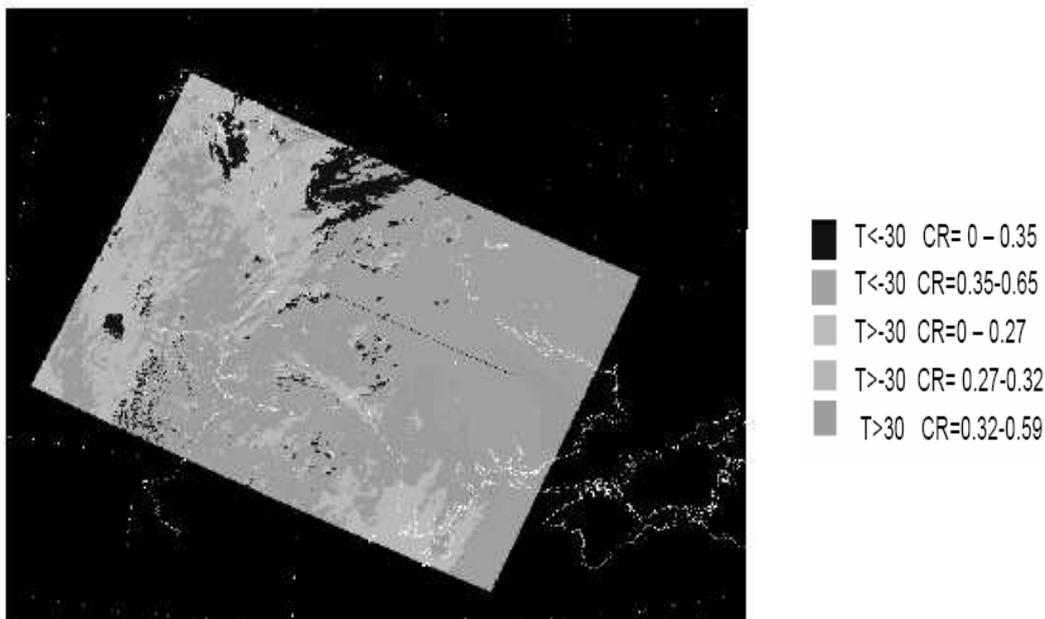


Рис. 2. Измеренные значения CR в канале 1,6 мкм 9.12. 2002 г., 09:46 GMT)

**Микрофизические и оптические характеристики тонких слоистообразных облаков**

В табл. 2 приведены результаты расчётов для тонких облаков, где  $z_1$  и  $z_2$  – нижняя и верхняя граница области восходящих движений,  $z_2 - z_1 = 0,9$  км. В табл. 2  $LWC_m$  – максимальная жидкокапельная водность в моделируемом облаке на протяжении 5-20 часов развития;  $IWC_m$  – суммарная максимальная лёдность всех форм ледяных кристаллов; фазовое состояние облака CRH (cloud phase) указано по критериям, связанным с формулой (1).

Подчеркнём некоторые основные результаты:

- тонкие облака ( $\Delta z = 0,9$  км) осадков практически не дают (интенсивность меньше 0,01 мм/час);
- холодные тонкие облака (с высотой верхней границы облачности  $z_2 = 5,7$  км) содержат практически только кристаллы столбчатой формы;
- сравнительно тёплые тонкие облака (СТТ  $> -30^\circ\text{C}$ ),  $z_2 \leq 3,5$  км содержат практически только кристаллы-пластинки;
- при наличии только ядер нуклеации сублимационного типа такие облака практически не содержат капель.

Таблица 2

Микрофизические характеристики тонких моделируемых облаков

СТТ	Тип нуклеации	$Z_1$ , км	$Z_2$ , км	$A_s$ , $(\text{г}^\circ\text{C})^{-1}$	Капли		Пластинки		Столбики		СТН	Вариант
					IWC макс, г/кг	N макс, $1/\text{см}^3$	IWC макс, г/кг	N макс, $1/\text{см}^3 \cdot 10^{-2}$	IWC макс, г/кг	N макс, $1/\text{см}^3 \cdot 10^{-2}$		
Холодные	Сорбц.	4,8	5,7	0,015	0,02 (10h)	68 (10h)	--	--	0,01 (20h)	0,38 (20h)	смешанное облако; преобл. столбики	C11
				0,05	0,004 (5h)	18 (5h)	--	--	0,01 (20h)	0,55 (5h)	смешанное облако; преобл. столбики	C12
	Сублим.			0,015	--	--	0,000004 (20h)	0,001 (20h)	0,02 (20h)	1,05 (20h)	кристаллич. облако; преобл. столбики	D11
				0,05	--	--	0,00001 (20h)	0,004 (20h)	0,04 (20h)	2,55 (20h)	кристаллич. облако; преобл. столбики	D12
Тёплые	Сорбц.	3,0	3,9	0,015	0,1 (20h)	304 (20h)	0,01 (20h)	0,15 (20h)	--	--	смешанное облако; преобл. пластинки	C21
				0,05	0,03 (15h)	94 (15h)	0,02 (20h)	0,30 (20h)	--	--	смешанное облако; преобл. пластинки	C22
	Сублим.			0,015	--	--	0,03 (20h)	0,79 (20h)	0,002 (20h)	0,06 (20h)	кристаллич. облако; преобл. пластинки	D21
				0,05	--	--	0,03 (10h)	1,52 (10h)	0,002 (20h)	0,12 (20h)	кристаллич. облако; преобл. пластинки	D22

Таблиця 3

Диапазоны СOT и CR для облаков небольшой мощности (для тонких облаков)

Параметры нуклеации	Код варианта	$\lambda=0,6$ мкм		$\lambda=1,6$ мкм	
		СOT	CR	СOT	CR
СТТ<-30°C, сорб.	C11, C12	0,5-1,4	0,07-0,19	0,5-1,5	0,06-0,15
СТТ<-30°C, субли.	D11, D12	1,1-6,0	0,15-0,52	1,1-6,0	0,13-0,42
СТТ>-30°C, сорб.	C21, C22	2,3-5,9	0,26-0,54	2,4-6,1	0,18-0,38
СТТ>-30°C, субли.	D21, D22	4,3-14,7	0,32-0,66	4,3-14,7	0,20-0,32

В табл. 3 указаны диапазоны значений СOT и CR для тонких слоистообразных облаков.

Диапазоны, которые в мощных модельных облаках были пустыми, теперь заполнены. Однако тонкие облака не дают практически осадков и, следовательно, можно использовать критерии для выделения дождящих облаков, которые были сформулированы в предыдущих статьях авторов [2, 5, 6].

**Выводы**

Результаты моделирования слоистообразных смешанных облаков небольшой мощности (тонких облаков с толщиной  $\leq 0,9$  км) показывают, что такие облака при СТТ < -30 °C имеют малые оптические толщины в диапазоне 0,5-6,0, а при СТТ > -30 °C значения СOT в диапазоне 2,3-14,7. Значения облачной отражаемости (спутникового сигнала) CR для тонких облаков также невелики: в диапазоне 0,07-0,66 для канала  $\lambda = 0,6$  мкм, а для канала  $\lambda = 1,6$  мкм меньше 0,42. Такие тонкие облака практически не дают осадков (интенсивность меньше 0,01 мм/час). Таким образом, сформулированы ранее в работах [2, 5, 6] критерии выделения дождящих облаков остаются в силе.

\* \*

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., Кривобок А., Дорман Б. Восстановление микрофизических и оптических характеристик смешанных фронтальных облаков на основе радиометрических спутниковых данных // Вопросы физики облаков (Сб. статей памяти С.М. Шмелера). – 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. – 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 фор-

мирование сигнала спутникового радиометра // Тр. УкрНИГМИ. – 2004. – Вып. 253. – С. 59-71.

6. Дорман Б.А., Баханов В.П., Манжара А.А. Микрофизические и оптические характеристики фронтальных смешанных облаков (результаты численного моделирования) // Тр. УкрНИГМИ. – 2010. – Вып. 259. – С. 74-90.
7. Ку-Нан Лиоу. Основы радиационных процессов в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 278 с.
8. Bakhanov V.P., Dorman B.A. Precipitation formation in winter stratiform clouds with several crystal forms // Proc. of the 12-th Conf. on Clouds and Precipitation (Zurich). – 1996. – P. 846-649.
9. 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.
10. 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.
11. Macke A., Mueller J., Rashke E. Single scattering properties of atmospheric ice crystals // J. Atmos. Sci. – 1996. – Vol. 53. – P. 2813-2825.
12. 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.

Український науково-дослідницький гідрометеорологічний інститут, Київ

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

**Чисельне моделювання мікрофізичних і оптичних характеристик тонких шаруватих хмар**

Наведено результати чисельного моделювання мікрофізичних і оптичних характеристик фронтальних змішаних шаруватоподібних хмар невеликої потужності (тонких хмар із товщиною менше ніж 0,9 км). Особливу увагу приділено аналізу залежності оптичної товщини хмар та хмарної відбиваності (у спутникових радіометричних каналах із довжиною хвилі  $\lambda = 0,6$  мкм та  $\lambda = 1,6$  мкм) від фазового складу хмар. Тонкі хмари характеризуються невеликими величинами оптичної товщини СOT < 10-15, а також малими значеннями хмарної відбиваності: CR < 0,4 для  $\lambda = 1,6$  мкм і CR < 0,66 для

$\lambda = 0,6$  мкм, що узгоджується із даними супутникових радіометричних вимірювань.

**Ключові слова:** мікрофізична модель змішаних шаруватоподібних хмар, оптична товщина та відбиваність сонячного випромінювання тонких хмар, результати моделювання, супутникові дані.

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

**Numerical modeling of microphysical and optical characteristics of thin stratiform clouds**

*The article presents the results of numerical modeling of microphysical and optical characteristics of frontal mixed*

*stratiform clouds of thin clouds (with thickness less than 0,9 km). Special attention is paid to analysis of the dependence of optical thickness of clouds and cloudy reflectances (in satellite radiometric channels with wavelength  $\lambda = 0,6 \mu$  and  $\lambda = 1,6 \mu$ ) on the phase composition of clouds. Thin clouds are characterized by small values of optical thickness ( $COT < 10-15$ ), and also small values of cloud reflectance ( $CR < 0,4$  for  $\lambda = 1,6 \mu$  and  $CR < 0,66$  for  $\lambda = 0,6 \mu$ ), which is consistent with satellite radiometric measurements.*

**Keywords:** microphysical model of mixed stratiform clouds, optical thickness and reflectance of sunlight of thin clouds, results of simulation, satellite data.

УДК 551.576

**Т.М. Заблоцька, Т.М. Шпиталь**

## **КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ ПОВТОРЮВАНOSTІ ЯСНОГО Й ПОХМУРОГО СТАНУ НЕБА ЗА ЗАГАЛЬНОЮ ТА НИЖНЬОЮ ХМАРНІСТЮ**

За даними спостережень на 29 метеорологічних станціях України протягом 1961-2010 рр. визначено зміни повторюваності ясного й похмурого стану неба за загальною та нижньою хмарністю. Довгоперіодичну складову кліматичних змін оцінено за тридцятирічними ковзними та лінійним трендом, флуктуації – за різницею сезонних та річних значень повторюваності між послідовними десятиріччями.

**Ключові слова:** кліматичні зміни, повторюваність ясного й похмурого стану неба, загальна й нижня хмарність, довгоперіодична складова, флуктуації, тридцятирічні ковзні, послідовні десятиріччя.

### **Вступ**

Повторюваність ясного й похмурого стану неба – це один із головних показників хмарного покриву. Саме за цією величиною можна найточніше оцінювати кліматичні зміни хмарності. Безпосередньо хмарний покрив є одним з головних регуляторів радіаційного балансу, також за ним можна визначати особливості циркуляції атмосфери та випадання опадів.

Вибраний період дослідження (1961-2010 рр.) збігається з періодом глобального потепління. На сьогодні чітко не визначено причину підвищення приземної температури повітря (рівнозначно вважають, що це дія природних чинників [1, 4, 5] або вплив антропогенного фактора [2, 3]), тому оцінка різних показників, що формують кліматичну систему, є актуальною.

### **Матеріали та метод дослідження**

Для дослідження змін повторюваності ясного й похмурого стану неба використано дані спостережень за хмарним покривом на 29 метеорологічних станціях, що рівномірно висвітлюють територію. Період дослідження з 1961 до 2010 р. включно. До аналізу залучено середні за місяць та рік розрахунки повторюваності ясного й похмурого стану неба за загальною та нижньою хмарністю.

Довгострокову складову кліматичних змін повторюваності ясного й похмурого стану неба за загальною та нижньою хмарністю оцінювали за змінами між тридцятирічними ковзними (1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 рр.) та лінійними трендами, флуктуації – за різницею між послідовними десятиріччями (1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000, 2001-2010 рр.). Отримані дані систематизовано за регіонами (північ, захід, центр, схід, південь) та сезонами року.