

Т.М. Заболоцька, Т.М. Шпиталь, В.М. Підгурська

## **ВЕРТИКАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ВОДНОСТІ В ХМАРАХ РІЗНИХ ФОРМ**

За даними літакового зондування атмосфери в центральних районах України (1961-1990 рр.) визначено вертикальні профілі вогності в основних формах хмар холодного періоду року. Вертикальні розподіли вогності представлено безрозмірними показниками та апроксимовано інтерполяційними поліномами.

**Ключові слова:** літакове зондування атмосфери, вертикальний профіль вогності, різні форми хмар, безрозмірний показник, апроксимація, інтерполяційні поліноми.

### **Вступ**

Для вирішення теоретичних (побудова теорії взаємодії хмар і радіації, формування і мінливості клімату та загальної циркуляції атмосфери) і прикладних (розрахунки обледеніння літаків, розподіл електромагнітного випромінювання та ін.) завдань необхідні знання статистики мікрофізичного стану хмар різних форм.

Мікрофізичний стан кожної хмари безперервно змінюється в просторі й часі, тому для визначення статистичних закономірностей потрібно аналізувати великий обсяг спостережень. У [1] на базі накопичених у 1977-1984 рр. експериментальних даних про мікрофізичний стан хмар (93 зондування) представлено варіант параметризації вертикального розподілу вогності. Проте слід зауважити, що для збільшення об'єму вибірки в [1] групувались дані, отримані в різних фізико-географічних умовах (Прибалтика, окремі райони Європейської території Росії, Середня Азія, Далекий Схід) та в різний час (від березня до грудня, з перевагою даних за теплий період). Крім того, в одну групу включали дані зондувань, виконані в шаруватих і висококупчастих хмарах.

Завдяки літаковому зондуванню атмосфери протягом 30 років (1961-1990 рр.) в Україні накопичено значну кількість вимірів мікрофізичних параметрів хмар різних форм. Зондування виконували практично над одними й тими самими центральними районами України, тобто не було

фізико-географічного впливу на параметри хмар, що відповідно зменшувало їх мінливість. У роботі використано дані зондувань у холодний період року (листопад-березень), коли спостерігають найбільшу повторюваність шаруватоподібних хмар (переважно фронтального походження), тому визначені вертикальні профілі водності можна вважати відповідними до фізичних процесів, що відбуваються в хмарах.

### **Матеріали та метод досліджень**

Однією з найбільш важливих фізичних характеристик хмар різних форм є водність ( $W$ , г/м<sup>3</sup>). Для побудови вертикального профілю водності та його параметризації було створено бази даних для хмар різних форм: St (шаруватих), Sc (шарувато-купчастих), Ns (шарувато-дощових), Ns-As (систем шарувато-дощових і високошаруватих), As (висококупчастих) і As (високошаруватих). У базу даних вносили тільки ті значення водності, які отримували в процесі повного вертикального зондування хмари з чіткою фіксацією її меж і подальшими вимірами водності та температури. Головну увагу приділяли вертикальному профілю водності, який визначали для кожної хмари.

Для зменшення впливу просторово-часової мінливості водності хмари, а також для забезпечення можливості співставлення вертикальних розподілів водності в хмарах різних форм, визначали її відносні значення в різних прошарках хмари. Товщину кожної хмари приймали за одиницю, потім у хмарі від нижньої до верхньої межі виділяли шість прошарків: 0,01-0,10, 0,11-0,25, 0,26-0,50, 0,51-0,75, 0,76-0,90, 0,91-0,99. Перші два прошарки характеризують нижню частину хмари, третій і четвертий – середню, останні два – верхню. Висоту, на якій виконували вимір водності, визначали в частках від товщини хмари:  $H_{\text{відн}} = H - H_{\text{ниж}} / \Delta H$  (відносна висота), а водність – в частках від її середнього значення по всій товщині хмари:  $W_{\text{відн}} = W / W_{\text{сер}}$  (відносна водність). Отримані дані групували у відповідних прошарках. Відносні значення висоти виміру та водності є безрозмірними показниками. Кількість вимірів водності в різних прошарках хмар, залежно від температури на нижній межі, представлено в табл. 1.

Дані таблиці свідчать про достатньо великий обсяг вимірів водності (більше ніж 7000). Найбільше вимірів водності було виконано у шаруватих (2469), шарувато-дощових (2313) і шарувато-купчастих (1611) хмарах. Значно менше – у системах шарувато-дощових та

високошаруватих (373) хмар, високошаруватих (207) і висококупчастих (187) хмарах.

Таблиця 1

Кількість вимірів водності в прошарках хмар різних форм за від'ємними і додатними значеннями температури на нижній межі ( $T_{\text{HM}}$ )

Форма хмар	$T_{\text{HM}}$	Прошарки						Всього
		0,01-0,10	0,11-0,25	0,26-0,50	0,51-0,75	0,76-0,90	0,91-0,99	
St	Додатна	47	94	192	172	101	55	661
	Від'ємна	106	241	505	519	281	156	1808
Sc	Додатна	20	49	81	83	51	24	308
	Від'ємна	75	194	350	386	202	96	1303
Ns	Додатна	46	105	190	177	92	59	669
	Від'ємна	144	250	420	431	248	151	1644
Ns-As	Від'ємна	52	73	108	78	40	22	373
Ac	Від'ємна	9	34	41	61	25	17	187
As	Від'ємна	24	26	48	55	35	19	207

Щодо кількості вимірів у різних прошарках, то їх більше в середині хмари і менше біля нижньої та верхньої меж. Кількість вимірів за від'ємної температури на нижній межі хмар у 3-4 рази більша, ніж за додатної.

### Результати досліджень та їх аналіз

У табл. 2, 3 представлено загальні характеристики хмар – товщину і температуру на нижній межі. Для аналізу використано дані вимірів у 1188 хмарах. Із них 36 % – St, по 27 % – Sc і Ns, по 3 % – Ns-As і As і 4 % – Ac.

Таблиця 2

### Повторюваність (%) товщини хмар різних форм

Форма хмар	Товщина, км								Кількість хмар
	< 0,4	0,41-0,8	0,81-1,2	1,21-1,6	1,61-2,0	2,01-2,4	2,41-2,8	2,81-3,2	
St	54	40	5	1	-	-	-	-	426
Sc	59	34	7	-	-	-	-	-	326
Ns	16	39	24	13	7	1	-	-	322
Ns-As	-	6	12	6	16	28	16	16	35
Ac	49	38	2	7	4	-	-	-	43
As	28	41	22	6	-	-	-	3	36

Товщина переважної більшості шаруватих (54 %) і шарувато-купчастих (59 %) хмар була меншою ніж 400 м, а в 95 % випадків – не перевищувала 800 м. Приблизно такий самий розподіл і у висококупчастих хмарах – відповідно 49 і 87 %.

Інші форми хмар мали більшу товщину: 50, 75, 90 і 95 % квантілі розподілу у шарувато-дощових хмарах складала відповідно – 750, 1150, 1500, 1800 м, у високошаруватих – 600, 900, 1200, 1500 м, у системах шарувато-дощових і високошаруватих хмар – 2150, 2600, 2950, 3050 м.

Температура на нижній межі в усіх різновидностях хмар була переважно від’ємною, проте відмічали і додатну: у St, Ns і Ns-As – 26-28 % випадків, у Sc – 16 %, Ac і As – 6 % (табл. 3).

Таблиця 3

Повторюваність (%) температури на нижній межі хмар різних форм

Форма хмар	Температура, °C									Кількість хмар
	>8	8...4,1	4...0	-0,1...-4	-4,1...-8	-8,1...-12	-12,1...-16	-16,1...-20	<-20	
St	1	6	19	40	29	5	-	-	-	426
Sc	1	4	11	30	30	22	2	-	-	326
Ns	-	5	22	47	19	7	-	-	-	322
Ns-As	-	6	22	49	12	11	-	-	-	35
Ac	-	2	4	4	30	26	12	15	7	43
As	-	-	6	25	28	22	11	8	-	36

У хмарах нижнього ярусу і системах Ns-As максимум повторюваності перебував в інтервалі -0,1...-4° C. У 60-69 % випадків  $T_{\text{нм}}$  спостерігали в межах від -0,1 до -8° C і практично не відмічали нижчою ніж -12° C. У хмарах середнього ярусу максимум повторюваності був в інтервалі від -4,1° C до -8° C (28-30 %), проте сам розподіл відрізнявся.

Висококупчасті хмари були холоднішими, ніж високошаруваті ( $T_{\text{нм}}$  нижче ніж -8° C у висококупчастих хмарах фіксували у 60 % випадків, а у високошаруватих – 41 %, в інтервалі 4... -4° C – відповідно 8 і 31 %).

Найбільш водними були шаруваті хмари (табл. 4). Найменша водність характерна для висококупчастих хмар. Для більшої частини хмар (крім шаруватих) максимум повторюваності приходився на градацію 0,01-0,10 г/м<sup>3</sup>.

Таблиця 4

Повторюваність (%) середніх значень водності в хмарах різних форм

Форма хмар	Водність, г/м <sup>3</sup>								Кількість хмар
	0,01- 0,10	0,11- 0,20	0,21- 0,30	0,31- 0,40	0,41- 0,50	0,51- 0,60	0,61- 0,70	0,71- 0,80	
St	23	34	20	10	7	4	1	1	426
Sc	36	35	18	6	3	1	1	-	326
Ns	33	31	20	9	6	1	-	-	322
Ns-As	37	37	6	11	9	-	-	-	35
Ac	53	33	12	-	2	-	-	-	43
As	44	39	8	6	3	-	-	-	36

Відповідні квантілі розподілу (%) становили:

Форма хмар	50 %	75 %	90 %	95 %
St	0,18	0,28	0,43	0,53
Sc	0,15	0,23	0,32	0,40
Ns	0,16	0,27	0,36	0,44
Ns-As	0,15	0,22	0,39	0,45
Ac	0,09	0,16	0,24	0,28
As	0,13	0,18	0,29	0,38

У хмарах нижнього ярусу середні значення водності із ймовірністю 50 % майже не відрізняються від середніх значень водності у хмарах середнього ярусу. Ймовірності з 90 і 95 % вказують, що середні значення водності в хмарах зменшуються в такій послідовності: шаруваті, системи шарувато-дощових і високошаруватих, шарувато-дощові, шарувато-купчасті, високошаруваті, висококупчасті хмари.

Дані табл. 5 свідчать, що у шаруватих, шарувато-купчастих і шарувато-дощових хмарах тип вертикального розподілу  $W_{\text{відн}}$  майже однаковий за додатних чи від'ємних температур на нижній межі, тобто практично не залежить від знаку  $T_{\text{нм}}$ . У середньому відмінності між профілями за додатних чи від'ємних значень  $T_{\text{нм}}$  у St становлять 1 %, Sc – 4 % і Ns – 4,4 %. Проте слід зазначити, що існує думка про більшу випуклість профілю зі збільшенням температури [2]. Це відмічають тоді, коли профіль будується за конкретними вимірами, а не за відносними значеннями водності. Дійсно, чим вища температура, тим більше значення водності, але тоді й середні значення буде більшим.

Таблиця 5

Середні значення відносної водності ( $W_{\text{відн}}$ ) в послідовних прошарках різних форм хмар за від'ємними і додатними температурами на нижній межі

Форма хмар	$T_{\text{нм}}$	Прошарки					
		0,01-0,10	0,11-0,25	0,26-0,50	0,51-0,75	0,76-0,90	0,91-0,99
St	Додатна	0,60	0,64	0,96	1,11	1,16	1,34
	Від'ємна	0,59	0,72	0,86	1,13	1,26	1,32
Sc	Додатна	0,47	0,52	0,89	1,19	1,45	1,14
	Від'ємна	0,51	0,67	0,88	1,14	1,28	1,38
Ns	Додатна	0,65	0,89	1,01	1,10	1,06	0,97
	Від'ємна	0,79	0,96	1,01	1,02	1,09	1,04
Ns-As	Від'ємна	0,78	1,04	1,06	1,045	0,965	0,91
Ac	Від'ємна	0,77	0,56	0,90	1,13	1,48	1,10
As	Від'ємна	0,94	0,80	0,77	1,11	1,22	1,15

Тому для St, Sc і Ns дані було об'єднано незалежно від температури на нижній межі. Крім того, для збільшення статистики дані  $W_{\text{відн}}$  в хмарах Ns і Ns-As та Ac і As було також об'єднано і виділено в окремі групи (табл. 6).

Таблиця 6

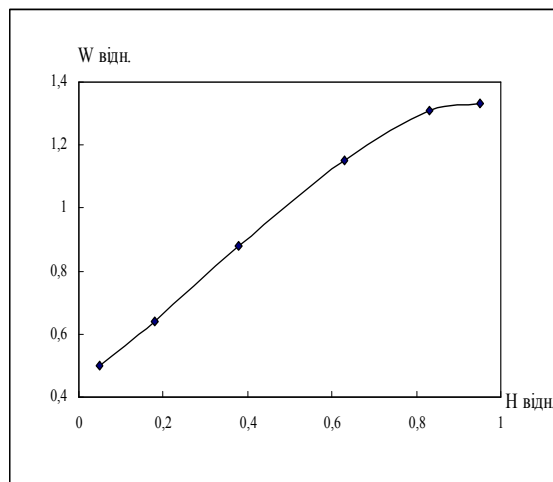
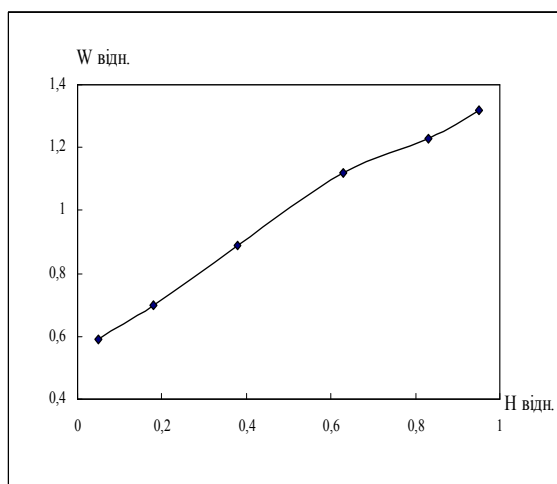
Середні значення відносної водності ( $W_{\text{відн}}$ ) в послідовних прошарках хмар різних форм безвідносно до температури на нижній межі

Форма хмар	Прошарки					
	0,01-0,10	0,11-0,25	0,26-0,50	0,51-0,75	0,76-0,90	0,91-0,99
St	0,59	0,70	0,89	1,12	1,23	1,32
Sc	0,50	0,64	0,88	1,15	1,31	1,33
Ns	0,76	0,94	1,01	1,04	1,08	1,02
Ns, Ns-As	0,76	0,96	1,02	1,045	1,07	1,01
Ac, As	0,89	0,66	0,83	1,12	1,33	1,13

Сумісний аналіз табл. 5 і 6 та рис. 1-4 вказує, що в шаруватих та шарувато-купчастих хмарах водність зростає від нижньої до верхньої межі, інтенсивність зростання найбільша в середині хмари (прошарок 0,26-0,75, рис. 1 а). У шарувато-купчастих хмарах зростання водності біля верхньої межі повільніше, ніж у шаруватих хмарах (рис. 1 б).

У шарувато-дошових хмарах водність теж зростає з висотою, найбільш інтенсивно в нижній частині хмар (у прошарку 0,11-0,25), потім

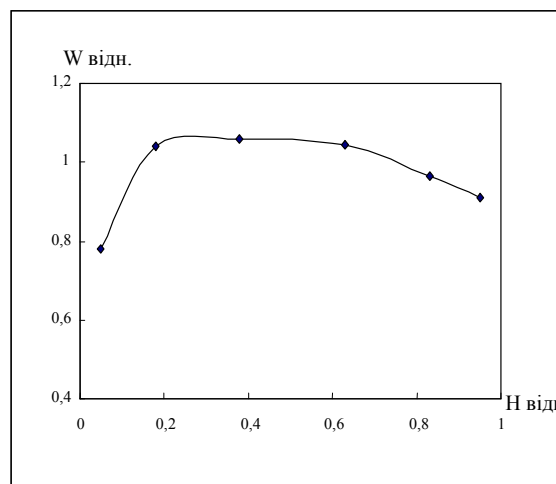
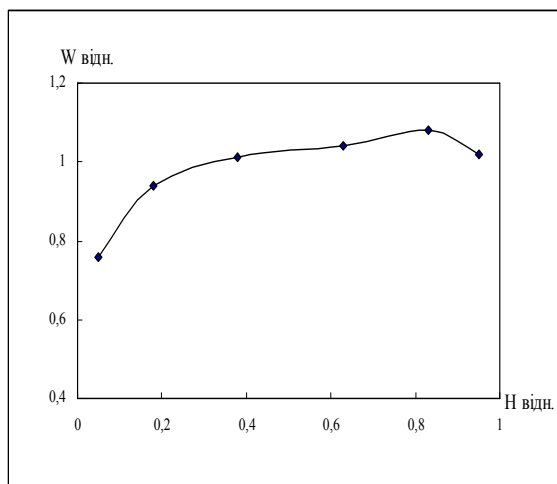
зростає дуже повільно по всій товщині, а біля верхньої межі зменшується (0,91-0,99, рис. 2 а).



а)

б)

Рис. 1. Вертикальний профіль відносної вологості в шаруватих (а) і шарувато-купчастих (б) хмарах



а)

б)

Рис. 2. Вертикальний профіль відносної вологості в шарувато-дощових (а) та системах шарувато-дощових і високошаруватих (б) хмар

У системах шарувато-дощових та високошаруватих хмар теж найінтенсивніше збільшення вологості спостерігається в прошарку 0,11-0,25, далі ( $3/4 \Delta H$ ) вона майже не змінюється і тільки у верхній частині хмари (0,76-0,99) зменшується (рис. 2 б).

Вертикальні розподіли вологості у висококупчастих і високошаруватих хмарах мають схожі риси (рис. 3 а, б). В обох формах

хмар у нижній частині відмічається зменшення водності (в  $A_s$  у прошарку 0,11-0,25, в  $A_s$  у цьому ж прошарку і дуже повільно у прошарку 0,26-0,50). Потім водність зростає і зменшується тільки біля верхньої межі (прошарок 0,91-0,99). Відмінності у вертикальному розподілі водності між  $A_s$  і  $A_s$  визначаються тим, що в  $A_s$  зростання водності з висотою відбувається інтенсивно майже по всій товщині хмари (прошарок 0,26-0,90) і різко зменшується біля верхньої межі (0,91-0,99), а в  $A_s$  інтенсивне зростання фіксується у прошарку 0,51-0,75, потім зростання більш повільне (прошарок 0,76-0,90), зменшення в прошарку 0,91-0,99 теж не різке.

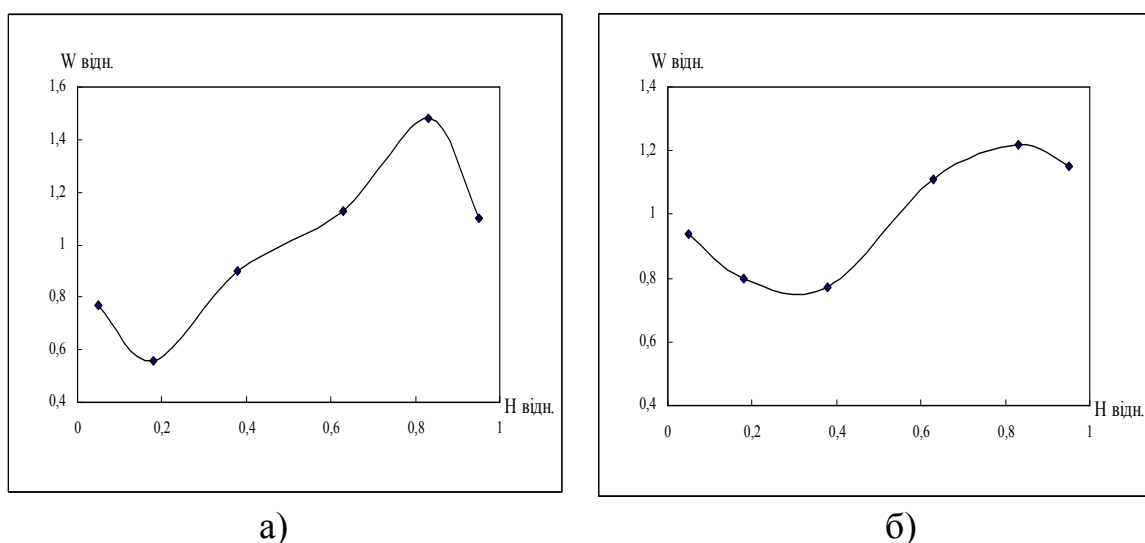


Рис. 3. Вертикальний профіль відносної водності у висококупчастих (а) і високошаруватих (б) хмарах

На рис. 4 а представлено вертикальний профіль водності загалом для  $N_s$  і  $N_s-A_s$ . Він повторює розподіл водності у  $N_s$  (вочевидь, через більшу кількість вимірів у цих хмарах). Загальний профіль водності для  $A_s$  і  $A_s$  показано на рис. 4 б. Кількість хмар обох форм, як і вимірів водності в них, приблизно однакові, загальний профіль указує, що в цих хмарах водність зменшується як в нижній частині хмари (0,11-0,25), так і біля верхньої межі (прошарок 0,91-0,99), в середині хмари водність зростає.

За абсолютними значеннями  $W_{\text{відн}}$  у вертикальному перетині хмар можна мати уяву про щільність конкретних хмар. Для  $St$  і  $Sc$  верхня половина (прошарок 0,51-0,99) має майже вдвічі більшу щільність, ніж нижня ( $W_{\text{відн}} > 1$ ). Нижня частина цих хмар має найменшу щільність серед усіх інших форм. Хмари  $N_s$  збільшують свою щільність, починаючи з



0,25ΔН і до верхньої межі; Ns-As мають найбільшу щільність у середині хмари (прошарок 0,11-0,75), а As і As – у верхній частині (0,51-0,99).

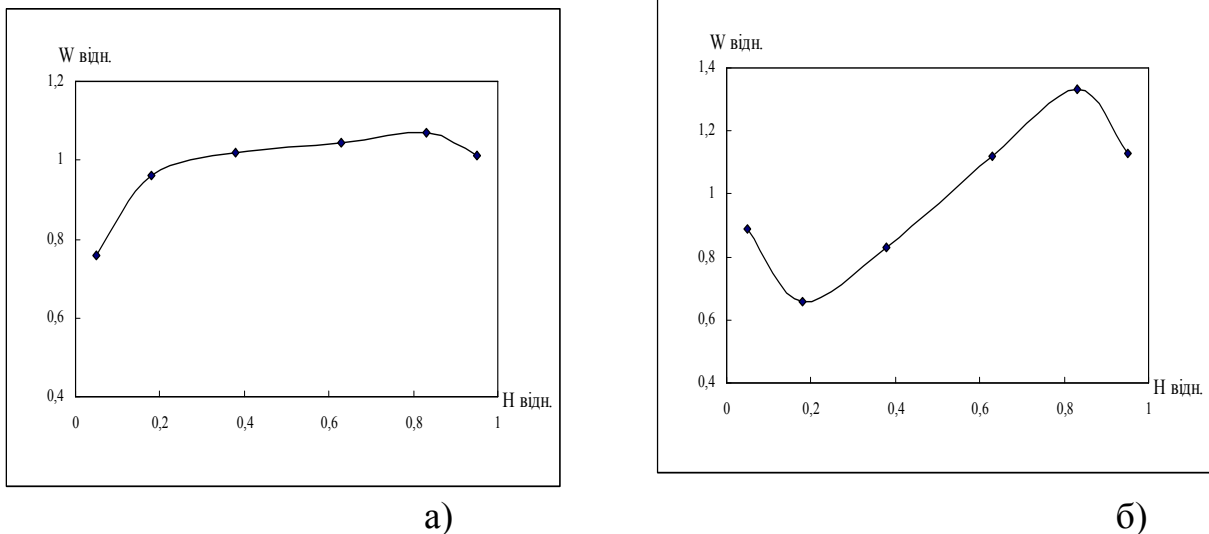


Рис. 4. Вертикальний профіль відносної вологості в шарувато-дощових хмарах та системах шарувато-дощових і високошаруватих (а) та висококупчастих і високошаруватих (б) хмар

Отримані вертикальні профілі відрізняються від представлених в [1], хоча температурні умови, в яких виконували зондування, приблизно однакові. Так, стверджується, що в об'єднаній групі As і St вологість помітно зростає з висотою, а у As змінюється незначно. Проте вертикальні профілі вологості у цих хмарах різні, більш подібні між собою профілі в As і As. Такі відмінності, вірогідно, зумовлені різною кількістю зондувань (1188 і 93), а також різними фізико-географічними умовами, за яких виконували зондування в [1].

Математична апроксимація вертикальних розподілів відносної вологості була виконана за допомогою інтерполяційних поліномів. Коефіцієнти визначали за методом найменших квадратів [3]. Криві вертикальних розподілів відносної вологості в хмарах різних форм описано такими формулами:

$$\text{St} \quad y = 0,529 + 1,061x - 0,242x^2$$

$$\text{Sc} \quad y = 0,410 + 1,472x - 0,505x^2$$

$$\text{Ns} \quad y = 0,706 + 1,452x - 1,918x^2 + 0,796x^3$$

$$\text{Ac, As} \quad y = 1,022 - 3,284x + 8,989x^2 - 4,901x^3 - 0,821x^4$$

Коефіцієнти кореляції між фактичними розподілами відносної вологості і побудованими за формулами становлять: у St – 0,999, Sc – 0,999, Ns – 0,991 і Ac, As – 0,993.

Особливість отриманих результатів полягає в тому, що вони визначені на основі аналізу надзвичайно великої кількості вимірів вологості, які виконували в процесі вертикальних зондувань конкретних форм хмар в одному й тому ж самому фізико-географічному районі. Аналогів, представлених у наших базах даних, у світі немає. Вертикальні розподіли вологості в основних формах хмар та їх апроксимація відповідними інтерполяційними поліномами можуть бути використані для вирішення як теоретичних, так і прикладних завдань.

### **Висновки**

У центральних районах України в холодний період року для основних форм хмар характерні такі параметри:

– товщина St, Sc не перевищує 800 м у 95 % випадків, крапельних Ns – у 55 %, Ac – у 87 % і As – у 69 %;

– для всієї сукупності досліджених хмар характернішою є від’ємна температура на нижній межі:  $T_{\text{нм}}$  до  $-8^{\circ}\text{C}$  у St спостерігають у 69 % випадків, Sc – 60 %, Ns – 66 %; максимальна повторюваність  $T_{\text{нм}}$  у Ac, As приходить на інтервал  $-4\dots-12^{\circ}\text{C}$ ;

– середню вологість у межах  $0,01-0,20\text{ г/м}^3$  у St фіксують у 57 % випадків, Sc – 71 %, Ns – 64 %, Ac – 86 % і As – 83 %.

Вертикальні профілі відносної вологості побудовано за даними зондувань 1188 хмар (7160 вимірів вологості).

Залежність вертикальних профілів відносної вологості від знаку температури на нижній межі хмар незначна: різниця у вузлах розподілів у St становить 1 %, Sc – 4 %, Ns – 4,4 %.

Вертикальні профілі відносної вологості апроксимовані інтерполяційними поліномами.

Коефіцієнти кореляції між фактичними розподілами відносної вологості і побудованими за формулами становлять: St – 0,999, Sc – 0,999, Ns – 0,991 і Ac, As – 0,993.

\* \*

1. Мазин И.П., Монахова Н.А., Шугаев В.Ф. Вертикальное распределение водности и оптических характеристик в континентальных облаках слоистых форм // Метеорология и гидрология. – 1996. – № 9. – С. 14-34.
2. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. Мазина И.П., Хргиана А.Х. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 647 с.
3. ЩигOLEB Б.М. Математическая обработка наблюдений. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 1962. – 344 с.

*Український науково-дослідний  
гідрометеорологічний інститут, Київ*

**Т.Н. Заболоцкая, Т.Н. Шпиталь, В.Н. Подгурская**

### **Вертикальное распределение водности в облаках различных форм**

*По данным самолетных зондирований атмосферы над центральными районами Украины (1961-1990 гг.) определены вертикальные профили водности в основных формах облаков холодного периода года. Вертикальные распределения водности представлены безразмерными показателями и аппроксимированы интерполяционными полиномами.*

**Ключевые слова:** самолетное зондирование атмосферы, вертикальный профиль водности, разные формы облаков, безразмерный показатель, аппроксимация, интерполяционные полиномы.

**T.M.Zabolotska, T.M.Shpital, V.M.Pidgurska**

### **The vertical distribution of liquid–water content in different cloud forms**

*By the data of airborne observations over central regions of Ukraine in 1961–1990 years have been determined the vertical distributions of relative liquid–water content in main cloud forms: stratus, stratocumulus, nimbostratus, systems of nimbostratus and altostratus, altocumulus, altostratus. The vertical distributions of relative liquid–water content have been approximated by interpolation polynomials.*

**Keywords:** airborne cloud observations, vertical distribution of liquid-water content, different cloud forms, dimensionless indicator, approximation, interpolation polynomials.