

Т.М. Заболоцька, Т.М. Шпиталь

## **ГОРИЗОНТАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ВОДНОСТІ У ХМАРАХ РІЗНИХ ФОРМ**

Систематизовано дані вимірів водності в горизонтальному просторі хмар різних форм: шаруватих, шарувато-купчастих, шарувато-дощових, високошаруватих і висококупчастих. Розраховано флуктуації водності в чотирьох прошарках (0,01-0,25, 0,26-0,50, 0,51-0,75, 0,76-0,99) кожної хмари відносно її нижньої межі. Визначено тип розподілу флуктуацій водності та масштаб неоднорідності.

### **Вступ**

Дані про мікрофізичний стан хмар різних форм потрібні для вирішення таких глобальних задач, як побудова теорії взаємозв'язку хмар і сонячної радіації, моделей загальної циркуляції атмосфери та змін клімату, а також для розв'язання прикладних проблем, а саме: для розрахунків обледеніння літаків, технології супутникових спостережень за хмарами, прогнозу хмар, оцінки поглинання електромагнітного випромінювання та ін. Без надійної інформації про мікроструктуру хмар різних форм неможливо уявити механізм утворення опадів.

Кожна хмара є дуже неоднорідним дисперсним середовищем, у якому неоднорідність властива всім її показникам. Тому їх визначення і подальше використання можливе завдяки аналізу великого обсягу спостережень. Проте в літературі існує небагато робіт, в яких визначення закономірностей просторового розподілу мікрофізичних параметрів виконано на достатньому статистичному матеріалі спостережень. У [2] на базі накопичених у 1977-1984 рр. експериментальних даних про мікрофізичний стан шаруватоподібних хмар рекомендовано параметризацію вертикального розподілу водності. Автори вважають свою роботу найбільш забезпеченою експериментальними даними, проте слід зауважити, що для збільшення об'єму вибірки об'єднувались дані, отримані в різних фізико-географічних умовах (Прибалтика, окремі райони ЄТР, Середня Азія, Далекий Схід) та в різний час (від березня до листопада). Крім того, в одну групу включали дані зондувань, виконані в шаруватих і висококупчастих хмарах.

В Україні накопичено значну кількість вимірів мікрофізичних параметрів хмар різних форм завдяки літаковому зондуванню атмосфери протягом 30 років (1960-1990 рр.). Зондування виконувались практично над одним і тим самим районом (центральні райони України), тобто не було фізико-географічного впливу, тому визначені параметри можна вважати відповідальними за фізичні процеси, що відбуваються у хмарах.

### **Матеріали та метод досліджень**

Однією з найбільш важливих характеристик мікроструктури хмар різних форм є водність. Для побудови вертикального профілю водності та його параметризації важливе значення має оцінка неоднорідності розподілу водності в горизонтальному просторі, оскільки під час вертикального зондування хмар літак по горизонталі пролітає у 20-50 разів більший шлях, ніж по вертикалі.

Визначаючи просторову неоднорідність розподілу водності, використовували виміри на горизонтальних площадках, які здійснювали на різних рівнях у хмарі. Загалом було створено бази даних для хмар різних форм: шаруватих (St), шарувато-купчастих (Sc), шарувато-дощових (Ns), високошаруватих (As) і висококупчастих (Ac), в яких кожна хмара була представлена такими характеристиками, як межі хмари, температура на них, товщина, рівні вимірів водності, визначені відносно нижньої межі, розраховані флуктуації водності та відстань між послідовними вимірами.

У роботі використано матеріали вертикальних зондувань з вимірами водності на горизонтальних площадках в шаруватих хмарах, шарувато-купчастих, шарувато-дощових, високошаруватих і висококупчастих (табл. 1).

Таблиця 1

Квантілі (50 % чисельник, 90 % знаменник) розподілу товщини температури на нижній межі хмар різних форм

Форма хмар	Товщина, км	Температура на нижній межі, °С	Кількість вимірів водності	Кількість зондувань
St	0,40 / 0,80	-2 / -7	2680	249
Sc	0,35 / 0,75	-4 / -10	1210	165
Ns	0,90 / 2,0	-1 / -7	760	95
As, Ac	0,40 / 1,0	-7 / -16	194	34

Щоб збільшити статистику, дані вимірів водності у As і Ac об'єднали в одну групу, тим більше, що середні значення товщини ( $\Delta H$ ) і температури на нижній межі ( $T_{\text{ни}}$ ) незначно відрізняються між собою. Всі зондування виконано в холодний період року, з листопада до березня включно, саме в цей час спостерігають найбільшу повторюваність шаруватоподібних хмар. Медіанні значення товщини (50 % квантіль) для St, Sc і As-Ac близькі між собою і становлять 0,35-0,40 км, для Ns удвічі більше – 0,9 км. У 90 % випадків товщина шаруватих та шарувато-купчастих хмар не перевищувала 0,8 км, високошаруватих та висококупчастих – 1,0 км і шарувато-дощових – 2,0 км (табл. 1).

Температура на нижній межі шаруватих і шарувато-дощових хмар практично однакова, у межах  $-1 \dots -7^\circ\text{C}$ , шарувато-купчастих –  $-4 \dots -10^\circ\text{C}$  і високошаруватих та висококупчастих –  $-7 \dots -16^\circ\text{C}$ . На нижній межі хмар (крім As-Ac) фіксували й позитивну температуру (від 0 до  $5^\circ\text{C}$ ): у Sc – 15%, St і Ns – 25 % випадків. Затримуючі прошарки (ізотермія та інверсія) спостерігали тільки у хмарах нижнього ярусу поблизу верхньої межі: у шаруватих хмарах – 46 % випадків, шарувато-купчастих – 42 %, шарувато-дощових – 11 %.

За даними [3], флуктуації водності в шаруватоподібних хмарах існують завжди з масштабом близько 1,0 км. На дещо більші значення масштабу неоднорідності, визначені за оптичною густиною, вказують у [1]: для St, Sc – 1,4 км, Ns – 1,6-1,7 км, As, Ac – у межах 0,85-1,2 км.

Виміри водності на горизонтальних площадках в Україні переважно виконували з дискретністю 10-20 сек. Усього було виконано близько 5000 вимірів (у St – 2680, Sc – 1210, Ns – 760 і As-Ac – 194). Всі виміри дали було згруповано за чотирма прошарками відносно нижньої межі хмари:  $H - H_{\text{ни}} / \Delta H = 0,01-0,25$ ,  $0,26-0,50$ ,  $0,51-0,75$  і  $0,76-0,99$ . У St, Sc, As-Ac вимірів у першому прошарку було 15 % від загальної кількості, другому і третьому – 30 %, четвертому – 25 %. У Ns кількість вимірів була майже однаковою у всіх прошарках (від 22 до 28 %). Дані вимірів водності на горизонтальних площадках можна вважати репрезентативними, оскільки, за попередніми дослідженнями [3], значення параметрів мікроструктури є такими, якщо здійснюється не менше ніж 20 вимірів у кожній хмарі.

### **Дослідження та їх аналіз**

Аналіз даних вимірів водності через значну їх мінливість проводили в декількох напрямках: а) розподіл флуктуацій водності ( $\Delta W$ ) залежно від її середнього значення в горизонтальному просторі, тому що

довжина площадок була різною; б) розподіл горизонтального градієнта водності; в) розподіл горизонтального градієнта водності залежно від товщини хмари; г) розподіл горизонтального градієнта водності за умови нормування кожного виміру водності на її середнє значення на площадці.

Всі напрями досліджень було опрацьовано на базі даних шаруватих хмар, оскільки саме в них виконано найбільшу кількість вимірів. У варіанті а) було виділено три групи хмар із середніми значеннями водності:  $< 0,10$ ,  $0,11-0,20$ ,  $> 0,20$  г/м<sup>3</sup>. На рис. 1 представлено розподіл  $\Delta W$  у хмарах із середньою водністю  $< 0,10$  г/м<sup>3</sup>, який можна віднести до біноміального типу.

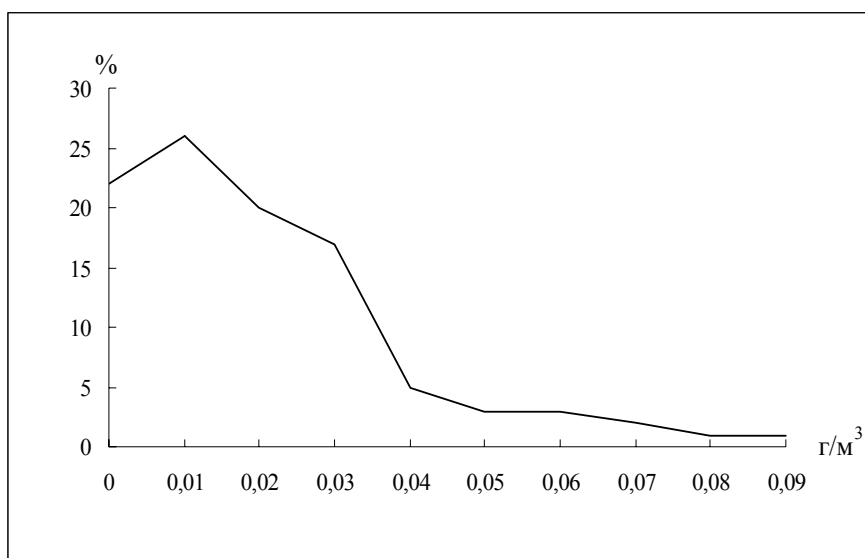


Рис. 1. Розподіл флуктуацій водності за її середнім значенням  $< 0,10$  г/м<sup>3</sup>

Подібний тип розподілу спостерігався і у двох інших групах хмар, проте були й відмінності. Вони полягали в тому, що зі збільшенням середньої водності розподіл стає більш пологим, тобто зменшується максимум, який властивий  $\Delta W = 0,01$  г/м<sup>3</sup> та розширюється спектр:

<u>Середня водність, г/м<sup>3</sup></u>	<u>Максимум, %</u>	<u>Розмах, г/м<sup>3</sup></u>
$< 0,10$	26	0 – 0,09
0,11 – 0,20	16	0 – 0,14
$> 0,20$	14	0 – 0,25

Розподіл горизонтального градієнта водності (варіант б) також можна віднести до біноміального. Подібний тип розподілу зберігається і у хмарах різної товщини:  $\Delta H \leq 300$ ,  $301-600$ ,  $> 600$  м (варіант в). Градієнт

розраховано на 1 км шляху і для зручності аналізу збільшено на  $10^2$  (табл. 2).

Таблиця 2

Повторюваність (%) горизонтального градієнта водності ( $\text{г/м}^3 \text{ км}^{-1} 10^2$ ) в шаруватих хмарах різної товщини

Товщина, м	0	0...1	1...5	5...10
$\leq 300$	16	31	29	24
301 – 600	8	38	34	20
$> 600$	6	33	42	19

Дані табл. 2 свідчать, що зі збільшенням  $\Delta H$  зменшується повторюваність 0-х значень градієнта (відповідно 16, 8, 6 %). Максимальна повторюваність його для хмар товщиною  $\leq 300$  і 301-600 м припадає на градацію 0...1, а для хмар з  $\Delta H > 600$  м – на градацію 1...5.

Розподіл горизонтального градієнта водності за умови нормування кожного виміру водності на її середнє значення на площадці (варіант 2) також має біноміальний тип розподілу (рис. 2).

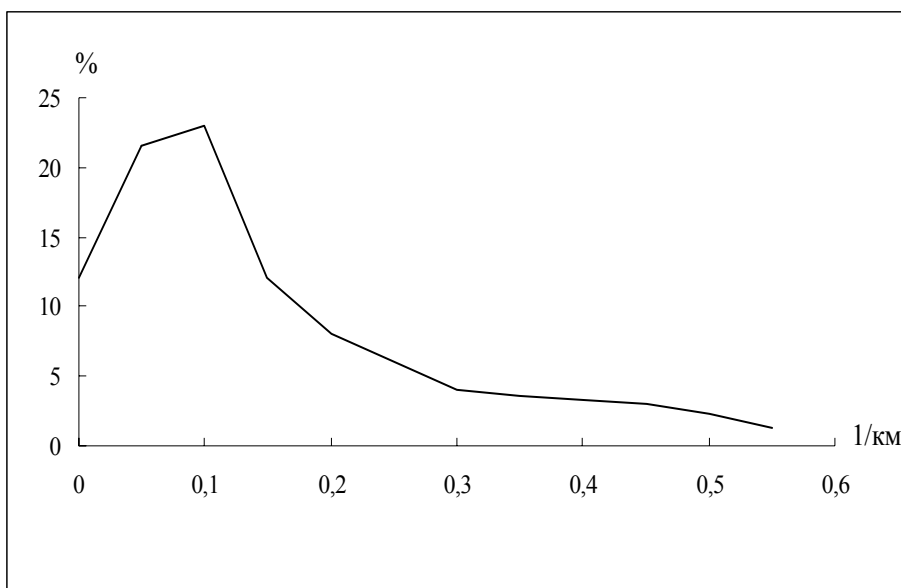


Рис. 2. Повторюваність (%) горизонтального градієнта нормованої водності

Водність у будь-якій хмарі нерівномірно змінюється по вертикалі, тому розподіл  $\Delta W$  було розглянуто в горизонтальному просторі чотирьох прошарків за висотою відносно нижньої межі шаруватих хмар (0,01-0,25, 0,26-0,50, 0,51-0,75, 0,76-0,99). У цілому тип розподілу  $\Delta W$  по горизонталі у всіх прошарках є біноміальним. Малі значення флуктуацій водності (0 і

0,01 г/м<sup>3</sup>) мають найбільшу повторюваність, проте вона зменшується від нижньої межі до верхньої (відповідно 35, 23, 24, 17,5 %). Ширина спектра також збільшується. Таким чином, флуктуації водності менші в першому прошарку (поблизу нижньої межі) і найбільші в четвертому (біля верхньої межі хмар); у другому і третьому прошарках параметри розподілу практично однакові.

Розподіл значень  $\Delta W$  для всіх форм хмар (за вибіркою у 95 %) є однаковим – біноміальним (рис. 3). Максимум розподілу приходить на малі значення флуктуацій водності (0, 0,01 г/м<sup>3</sup>): St – 26, Sc – 29, Ns – 19, As-Ac – 22 %. Ширина спектра збільшується від St, Sc до Ns, As-Ac: St – 0...0,19, Sc – 0...0,17, Ns – 0...0,30, As-Ac – 0...0,39 г/м<sup>3</sup>.

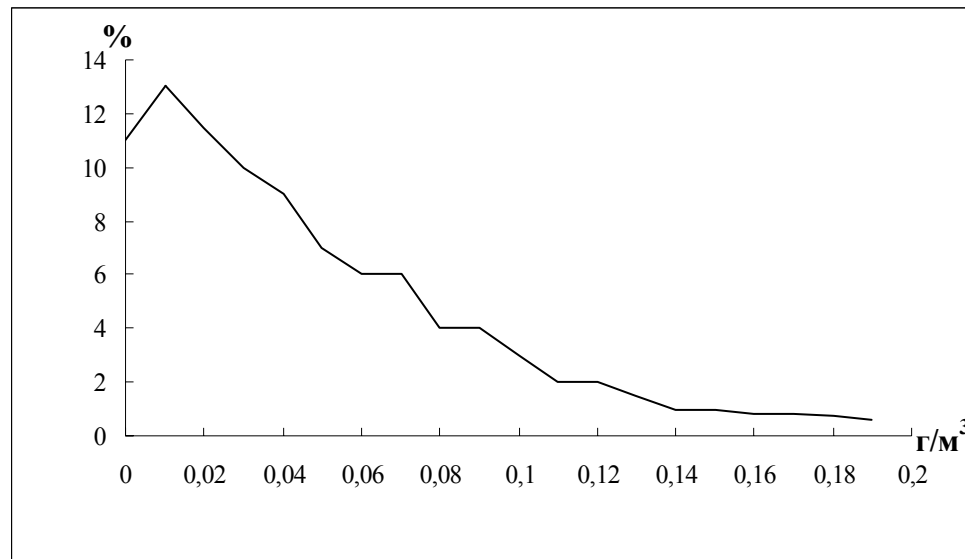


Рис. 3. Повторюваність (%) флуктуацій водності (г/м<sup>3</sup>) у шаруватих хмарах

Відповідні квантілі розподілу  $\Delta W$  (г/м<sup>3</sup>) у хмарах різних форм:

Квантілі, %	St, Sc	Ns, As-Ac
50	0,03 – 0,04	0,05
75	0,06 – 0,07	0,13 – 0,15
90	0,12 – 0,13	0,24 – 0,30

Таким чином, для шаруватих і шарувато-купчастих хмар характерні менші значення флуктуацій водності.

Спектр відстаней (L, км), на яких фіксували значення водності, найвужчий у St, далі від Sc до As-Ac він розширюється. Проте більша частина (90 % від загальної кількості) вимірів водності на горизонтальних

площадках у St здійснювали на відстанях до 3,6 км, Sc – 3,9, Ns – 4,1, As-As – 4,5 км. Якщо зважити, що за вертикальним зондуванням атмосфери вимір водності здійснюється на шляху у 5-10 км, то для кожної форми хмар за визначенням водності на певній висоті враховуються існуючі флуктуації у горизонтальному просторі (табл. 3).

Таблиця 3

Квантілі (n,%) розподілу масштабу неоднорідності (км) для різних значень флуктуацій водності (г/м<sup>3</sup>)

Форма хмар	n, %	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09-0,10	0,11-0,13
St	50	1,85	1,80	1,80	1,80	1,85	1,80	1,75	1,75	1,65		
	75	2,50	2,45	2,60	2,60	2,80	2,30	2,50	2,25	2,25		
	90	3,45	3,50	3,70	3,70	3,50	3,20	3,70	3,90	2,75		
Sc	50	1,80	1,95	1,80	1,85	1,80	2,10	1,80				
	75	2,50	2,90	2,90	3,20	2,50	2,75	2,75				
	90	3,50	3,65	4,0	4,10	3,20	3,70	4,0				
Ns	50	2,80	2,25	2,30	2,15	2,45	2,25	2,35	2,35	2,50	2,35	2,20
	75	3,90	3,0	3,35	3,0	4,10	3,50	3,05	3,45	3,30	3,95	3,90
	90	5,60	4,80	4,8	3,80	5,20	4,65	4,60	4,30	4,75	5,20	5,45
As-As	50						2,85					3,10
	75						4,50					4,90
	90						6,0					7,20

Масштаб неоднорідності в кожній формі хмар визначено для основного діапазону флуктуацій водності: у St – 0-0,08, Sc – 0-0,06, Ns – 0-0,13 і As-As – 0-0,15 г/м<sup>3</sup>. Через невелику кількість вимірів водності у As-As її флуктуації представлено двома групами: 0-0,05 і 0,06-0,15 г/м<sup>3</sup>.

Дані свідчать, що у St з імовірністю 50 % основну частину спектра флуктуацій водності можна спостерігати на відстані до 1,8 км, з імовірністю 75 % – 2,4-2,5 км, а з імовірністю 90 % – до 3,5 км.

Така тенденція характерна кожній формі хмар, тільки масштаб неоднорідності різний. Якщо розглядати тільки ті значення флуктуацій водності, що мають максимальну повторюваність 0 і 0,01 г/м<sup>3</sup> (тобто майже однорідні ділянки), то з імовірністю 90 % у St їх можна спостерігати на відстані до 3,4-3,5 км, Sc – 3,5-3,7, Ns – 4,8-5,6 і As-As – 5,2 км.

## **Висновки**

Розподіл флуктуацій водності в горизонтальному просторі всіх форм хмар є біноміальним.

Тип горизонтального розподілу флуктуацій водності зберігається на різних рівнях відносно нижньої межі хмар.

Спектр розподілу флуктуацій водності збільшується від шаруватих (St) та шарувато-купчастих (Sc) до шарувато-дощових (Ns) і далі до високошаруватих (As) і висококупчастих (Ac) хмар.

Флуктуації водності з імовірністю 75 % у шаруватих хмарах існують у межах  $0...0,08 \text{ г/м}^3$ , шарувато-купчастих –  $0...0,06 \text{ г/м}^3$ , шарувато-дощових –  $0...0,13 \text{ г/м}^3$ , високошаруватих і висококупчастих –  $0...0,15 \text{ г/м}^3$ .

\* \*

1. Косарев А.Л., Мазин И.П., Невзоров А.Н., Шугаев В.Ф. Оптическая плотность облаков // Тр. ЦАО. – 1976. – Вып. 124. – 169 с.
2. 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.
3. Минервин В.Е. Флуктуации водности в облаках слоистых форм // Тр. ЦАО. – 1966. – Вып. 71. – С. 92-111.

*Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут, Київ*

**Т.Н. Заболоцкая, Т.М. Шпиталь**

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

*Систематизированы измерения водности в горизонтальном пространстве облаков различных форм: слоистых, слоисто-кучевых, слоисто-дождевых, высокослоистых и высококучевых. Рассчитаны флуктуации водности в четырех слоях (0,01-0,25, 0,26-0,50, 0,51-0,75, 0,76-0,99) каждого облака относительно его нижней границы. Определены тип распределения флуктуаций водности и масштаб неоднородности.*

**T.M. Zabolotska, T.M. Shpital**

### **Horizontal distribution of liquid-water content in different cloud forms**

*Systematized measurements of liquid-water content horizontal space of clouds of various forms: stratus, stratocumulus, nimbostratus and altostratus. Fluctuations of liquid-water content intended in four layers (0,01-0,25, 0,26-0,50, 0,51-0,75, 0,76-0,99) of each cloud relative to its lower limit. The type of distribution of fluctuations and scale of dissimilarity are specified.*