

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

## **ПРОСТОРОВИЙ РОЗПОДІЛ ХМАРНОСТІ НА АТМОСФЕРНИХ ФРОНТАХ РІЗНОГО ТИПУ В УКРАЇНІ**

Визначено просторовий розподіл хмар різних форм відносно приземної лінії фронту за даними літакового зондування атмосфери. Виконано аналіз близько 2000 хмарних систем, які спостерігали на атмосферних фронтах, що характерні для території України: теплому, холодному, оклюзії, холодному з хвилями та вторинному холодному.

### **Вступ**

Хмарний покрив відносять до головних чинників формування клімату, оскільки він є найпотужнішим і найбільш змінним регулятором радіаційного режиму атмосфери та підстильної поверхні. Вивчення хмарного покриву актуальне як для оцінки змін клімату, побудови моделей загальної циркуляції атмосфери, так і для вирішення більш прикладних завдань – безпеки польотів авіації, оцінки поглинання електромагнітних хвиль, для сільського господарства, оскільки через зміни радіаційного балансу земної поверхні змінюється режим температури й вологи діяльного шару ґрунту і приземного шару повітря.

### **Загальні відомості**

У практиці міжнародного користування прийнята морфологічна (за зовнішнім виглядом) класифікація хмар, яка включає 10 головних форм, більшу частину яких ділять на види та різновидності. Ця класифікація певною мірою відображає й генетику хмар, тобто умови їх утворення.

Загалом виділяють три основні класи хмар: а) шаруватоподібні, які мають вид однорідної пелени чи суцільного покриву – Ns (шарувато-дощові), As (високо-шаруваті), Ci (перисті), Cs (перисто-шаруваті); б) хвилеподібні, поверхня яких неоднорідна й має вигляд хвиль, валів, плит – St (шаруваті), Sc (шарувато-купчасті), As (високо-купчасті), Cc (перисто-купчасті). Шаруваті хмари відносять до цього класу через умови утворення та хвильову структуру, яка помітна за спостереженнями зверху; довжина хвиль велика; в) конвективні, що мають вигляд відокремлених утворень – Cu (купчасті), Cb (купчасто-дощові).

Шаруватоподібні хмари виникають унаслідок упорядкованих висхідних рухів повітря, що охоплюють великі простори. Найчастіше це буває в зоні атмосферних фронтів, інколи за натіканням вологого повітря на пологі схили гір.

Хвилеподібні хмари утворюються в результаті турбулентного перемішування, що призводить до перерозподілу тепла та водяної пари, хвильових процесів на затримних поверхнях (інверсії) або на хвилях Кельвіна-Гельмгольца, що сприяють розвитку висхідних рухів. Цілком імовірно, хвилеподібні хмари можуть виникати й через висхідний плин уздовж дуже пологих фронтальних поверхонь (нахил 1:1000). Раніше вирішальну роль в утворенні та еволюції хвилеподібних хмар відводили радіаційним факторам, але останнім часом дослідження свідчать, що головними причинами є турбулентний обмін і висхідні рухи, а не радіаційні притоки тепла [1].

Конвективні хмари формуються внаслідок розвитку конвекції (вертикальних рухів повітря). Саму конвекцію може зумовлювати плавучість нестійко стратифікованих повітряних мас і нерівномірне нагрівання підстильної поверхні (термічна конвекція) або динамічні чинники: а) конвергенція потоків біля лінії фронту; б) розвиток вертикальних рухів на межі поверхонь з різною шорсткістю; в) спонукальний підйом повітря в горах.

### **Матеріали та метод дослідження**

На початку ХХ ст. метеорологи Норвезької школи розробили основні положення про атмосферні fronti та визначили, що з усіх процесів утворення хмар найбільш вагомим є фронтальний [3, 5]. На той час, за даними наземних спостережень, було створено умовні схеми розподілу хмар на двох типах фронтів: теплого й холодного, які відображають лише головні риси розподілу хмарності, що утворюється в результаті зіткнення різних за характеристиками типів повітряних мас.

Оскільки головними чинниками утворення хмар є наявність висхідних рухів, нестійкість атмосфери та вологовміст повітряних мас, то на їх формування впливає підстильна поверхня, наявність гірських масивів, морів. Україна невелика за площею (у синоптичному масштабі), проте на фронтогенез на її території впливає, насамперед, близькість Середземноморської планетарної висотної фронтальної зони, активність якої змінна, наявність Карпатських гір (частково впливають і Кавказькі гори), Чорного та Азовського морів. Крім того, для практичного

використання, наприклад розроблення чисельних моделей хмаро- та опадоутворення, необхідні дані розподілу хмар на всіх типах фронтів, що переміщуються територією України, а саме: теплому, холодному, холодному з хвилями, оклюзії та вторинному холодному. Зважаючи також на те, що хмари в тропосфері розміщуються на різних висотах (ярусах), а, зазвичай, фронтальні закривають весь небосхил, наземні спостереження не дають можливості оцінити ступінь закриття небосхилу хмарами різних ярусів через взаємне перекриття. Тому найбільш репрезентативною інформацією щодо просторового розподілу хмар різних форм є дані літакового зондування атмосфери.

Щоб визначити просторовий розподіл хмар на фронтах різного типу, було використано дані літакового зондування атмосфери над експериментальним метеорологічним полігоном Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту (центральні райони України) у холодний період (листопад-березень) з 1960 до 1990 р. У цей час майже щодня виконували вертикальні зондування хмар. Крім того, у холодну пору значно більше зміщується фронтів. Якщо в середньому за рік через територію України проходить близько 125 фронтів, то в зимовий і перехідні сезони – близько 100 [2].

Проаналізовано кожний випадок зондування хмар різних форм, зумовлених дією атмосферних фронтів. Залежно від часу зондування та швидкості руху фронту було розраховано відстань хмарної системи перпендикулярно до приземної лінії фронту. Зондування хмар виконано на всіх типах фронтів. Загалом було проаналізовано дані зондувань близько 2000 хмарних систем.

### **Результати досліджень та їх аналіз**

Незалежно від типу фронту за його зміщенням можна було фіксувати будь-які форми хмар, але співвідношення було різним: на теплих фронтах, холодних із хвилями та оклюзії шаруватоподібні хмари (Ns, Ns-As, As, Ci, Cs) мали повторюваність близько 60-65%, хвилеподібні (St, Sc, Ac) – 35-40%, на холодних і вторинних холодних відповідно близько 40 і 60%. Купчасті хмари (Cu) на всіх фронтах спостерігали рідко, у межах 1-4%.

Якщо порівнювати повторюваність суто фронтальних шарувато-дощових хмар та їх систем (Ns, Ns-As) з шаруватими (St) та шарувато-купчастими хмарами (Sc), тобто хмарами нижнього ярусу, які мають найбільший покрив, то на фронтах теплому, оклюзії та холодному із

хвилями спостерігали 35-40% випадків Ns і Ns-As; St і Sc – у межах 10-15%, причому фронт оклюзії майже однаково супроводжують і St, і Sc (~10%). На теплому фронті частіше бувають Sc (15%), а на холодному із хвилями – St (15%). На холодному і вторинному холодному фронтах шарувато-дощових хмар фіксували ~20% випадків, а шаруватих та шарувато-купчастих – ~45%, але є і відмінність: для холодних фронтів більш характерні St (25%), а для вторинних холодних – Sc (~30%) (табл.1).

Розподіл хмарності на теплому фронті відносно його приземної лінії такий: у зоні фронту ( $\pm 50$  км) переважають Ns, As, Ci, Cs (~80%); St, Sc, Ac, Cu – ~20%. Далі від лінії фронту (51-100 км, але перед фронтом) це співвідношення становить 65-70 і 30-35%, на відстані 101-200 км – ~60 і 40%, 201-300 км – ~45 і 55%, 301-400 км – 20-25 і 75-80%.

Таблиця 1

Повторюваність (%) хмар різних форм залежно від типу фронту

Тип фронту	Ns, Ns-As	As	Ac	Ci, Cs	St	Sc	Cu
Теплий	35	18	12	7	12	15	1
Оклюзії	40	16	11	9	12	9	3
Холодний з хвилями	37	19	13	6	15	9	1
Холодний	19	14	12	6	26	21	2
Вторинний холодний	19	10	15	8	17	27	4

За теплим фронтом на відстані до 100 км шаруватоподібних хмар відмічали майже порівну з хвилеподібними та конвективними (відповідно ~45 і 55%), але далі від лінії фронту їх кількість зменшувалася: на відстані 101-200 км – 35-40 і 60-65%, на відстані 201-300 км – 20 і 80%. Ширина смуги хмарного покриву, що аналізували, становила близько 700 км (400 км перед фронтом і 300 км за ним).

Розподіл хмарності на фронті оклюзії подібний до розподілу на теплому фронті: у зоні фронту та перед ним на відстані 100 км переважають шаруватоподібні хмари (відповідно ~80 і 65-70%), на відстані 100-200 км перед фронтом – 55-60%, 200-300 км – 55%. За фронтом повторюваність шаруватоподібних хмар значно зменшилася: на відстані до 100 км їх уже втричі менше (30-35%), ніж хвилеподібних.

Ширина досліджуваної фронтальної смуги хмарності становила 500 км (300 км перед фронтом, 200 км за ним).

Ширина хмарного покриву на холодному фронті із хвилями, де виконували зондування атмосфери, у середньому була 600 км (300 км перед фронтом і 300 км за ним). У передній частині фронту (до 200 км) переважали шаруватоподібні хмари: у зоні фронту – 65-70%, до 100 км – ~65%, від 100 до 200 км – ~60%, а на відстані 200-300 км шаруватоподібних та хвилеподібних хмар було зафіксовано порівну (50%). Поза фронтом на відстані до 100 км Ns, As, Ci, Cs було відмічено 60-65% випадків, далі від лінії фронту їх повторюваність зменшувалась і на відстані 200-300 км становила 35-40%.

Холодні фронти в середньому мали ширину хмарного покриву близько 500 км (200 км перед фронтом і 300 км за ним). У зоні фронту спостерігали 55-60% випадків шаруватоподібних хмар, перед фронтом на відстані до 200 км – 30%. За фронтом їх повторюваність значно знижувалась: на відстані до 100 км – 35-40%, 101-200 км – 15%, 201-300 км – 5%, тобто холодним фронтам більш характерні хвилеподібні хмари. Досить висока повторюваність шаруватоподібних хмар у зоні фронту та частково в передній його частині зумовлена своєрідністю фронтогенезу над Україною. На її територію виходить переважно уже сформована система фронтів, тобто майже завжди існує теплий сектор, в якому через наявність «теплої несучої смуги» перед холодним фронтом є умови для утворення шаруватоподібних хмар [4].

Вторинний холодний фронт мав досліджувану хмарну систему завширшки ~300 км (100 км перед фронтом і 200 км за ним). Тільки в зоні фронту ( $\pm 50$  км) повторюваність шаруватоподібних хмар становила 40-45%, а далі від лінії фронту як у передній частині, так і в тилівій таких хмар було зафіксовано значно менше (15-30%) (табл. 2).

Представлені дані розподілу хмарності на фронтах різного типу усереднені, але вони відображають просторову картину, бо побудовані за даними повної фіксації хмар у вертикальному просторі тропосфери.

Хмари, особливо фронтального походження, зазвичай перебувають у постійному розпаданні та новоутворюванні, умови яких вивчені недостатньо. Тому будь-які експериментальні дані щодо еволюції хмар мають практичне значення як для розробляння схем прогнозів хмарності, так і для вирішування інших завдань, наприклад для того, щоб вибирати

інтервали між супутниковими спостереженнями за хмарністю, урахуваючи просторово-часову змінність параметрів хмар.

Таблиця 2

Просторовий розподіл (%) шаруватоподібних (чисельник) і хвилеподібних, купчастих хмар (знаменник) відносно лінії фронту

Тип фронту	За фронтом, км			Зона фронту, ± 50 км	Перед фронтом, км			
	201-300	101-200	51-100		51-100	101-200	201-300	301-400
Теплий	20/80	37/63	46/54	79/21	67/33	59/41	46/54	22/78
Оклюзії	-	20/80	33/67	81/19	68/32	57/43	55/45	-
Холодний із хвилями	37/63	59/41	63/37	68/32	64/36	59/41	50/50	-
Холодний	6/94	16/84	38/62	58/42	33/67	27/73	-	-
Вторинний холодний	-	28/72	33/67	42/58	14/86	-	-	-

Залежно від розвитку синоптичних умов змінність параметрів фронтальних хмар може бути дуже різною. Наведемо два приклади: а) просторові та часові зміни хмарності на фронті оклюзії та теплому, що зміщуються зі швидкістю 30-40 км/год; б) на стаціонарному холодному та малорухомому теплому фронтах.

*Перший приклад.* Територія України охоплена улоговиною західного циклону, який перебуває у стадії розвитку (тиск у центрі 990 гПа, падіння тиску – 4,5 гПа за 3 год). Хмарну систему фронту оклюзії досліджували двома літаками-метеолабораторіями. Польоти були послідовними за такою схемою: а) горизонтальний політ Дніпропетровськ – Харків уздовж фронту в передній частині на відстані 150-200 км від його приземної лінії; проміжок часу між польотами – 35 хв; б) вертикальне зондування атмосфери в Харкові до 5850 м, через 35 хв – до 2700 м; в) горизонтальний політ Харків – Київ – Шепетівка через лінію фронту відповідно на висотах 5100 і 2600 м.

Дані двох послідовних горизонтальних польотів у передній частині фронту на висоті 1100-1200 м, протяжність яких становила 200-250 км, свідчать про швидку змінність хмарного покриву в просторі та часі. У першому польоті спочатку на відстані 100-120 км було зафіксовано не суцільну систему Sc-Ac, яка далі за маршрутом перейшла у більш щільну систему St-Sc-Ac. Іноді у Sc фіксували краплі дощу, які не досягали

поверхні землі. У другому польоті (через 35 хв, маршрут той самий) на відріжку 100-120 км уже відмічали систему Sc-Ns, а згодом Frnb (розірвано-дощові) та Ns. Із Ns випадав дощ. Хмари нижнього ярусу в обох польотах були крапельними.

У першому вертикальному зондуванні було відмічено: Frst (розірвано-шаруваті) на рівні 600 м, Sc у межах 1250÷1430 м, As-Cs (нижня межа на 2090 м, на рівні 4150 м As перейшли у Cs, верхньої межі не досягли; за інформацією з турбореактивних літаків верхня межа хмар була вище за 8000 м). У нижній частині As (до ~3000 м) іноді фіксували краплі різного розміру, але їх було настільки мало, що навіть найменше значення водності не реєстрували. Загалом хмари були кристалічні; у них утворювалися сніжинки, які, долітаючи до землі, танули й випадали у вигляді дощу. У другому вертикальному зондуванні (через 35 хв) на рівні 390 м уже відмічали серпанок, далі були розшаровані Ns з нижньою межею 900 м. Хмари кристалічні (стовпчики, пластинки, кристали невизначеної форми).

Подальші послідовні горизонтальні польоти до лінії фронту та за ним реєстрували кристалічну систему Ns-As-Cs змінної щільності. За лінією фронту ця хмарна система перейшла в розшаровані Sc-Ns, As-Ci, а потім Sc та Ci.

На теплому фронті обидва польоти було здійснено перпендикулярно до його приземної лінії з розривом у часі близько 2 год. У першому польоті на відстані 180-200 км перед теплим фронтом спостерігали систему Ns-As-Cs з нижньою межею ~ 1400 м. Цю систему хмар відмічали й за фронтом на відстані до 50-60 км. Опади як перед фронтом, так і за ним були у вигляді дощу, особливо сильні поблизу лінії фронту. Далі за фронтом Ns перейшли у Sc з подальшою появою As, Cu. Через 2 год (другий політ) на тій же самій відстані ~200 км перед теплим фронтом замість суцільної системи Ns-As-Cs реєстрували розшаровані хмари: Frst (300 ÷ 600 м), Ns (975 ÷ 1470 м), As (на рівні 2050, 2120 ÷ 3170, 3240 ÷ 3990, 4800 ÷ 5100 м), вище Ci і тільки у ближній передній частині фронту (до 100 км) ще залишалася більш-менш суцільна система Ns-As-Cs з нижньою межею ~1000 м та Frnb (385 ÷ 610 м).

Наведені приклади свідчать про значну мінливість у просторі та часі хмарного покриву на фронтах різного типу за їх середньостатистичним зміщенням, що зумовлено складним і змінним розподілом вологи та висхідних рухів у просторі фронтальних систем.

*Другий приклад.* Зондування хмар на стаціонарному холодному фронті виконували поблизу його приземної лінії (20 км за ним). Хмарний покрив складався із Sc (10 балів), As та Ci (6 балів). Зондували Sc (табл. 3).

Таблиця 3

Параметри шарувато-купчастих хмар (Sc)

Час зондування	Нижня межа, м	Температура на нижній межі, °С	Верхня межа, м	Температура на верхній межі, °С	Товщина хмар, м
12 год	430	- 4,9	810	- 8,2	380
13 год 35 хв	410	- 4,6	780	- 7,3	370
17 год 10 хв	480	- 5,8	850	- 8,3	370
21 год 40 хв	420	- 6,0	930	- 8,6	510

Наведені дані показують, що за стаціонуванням фронту параметри хмар майже не змінилися у часі. Протягом 10 год коливання меж хмар становило близько 5%, а товщини – 10%. Але параметри шарувато-купчастих хмар практично не змінювались і у просторі, якщо порівняти наведені дані з результатами іншого зондування, виконаного о 19 год 45 хв на відстані 130 км від лінії фронту (нижня межа 320 м, верхня межа – 800 м, товщина хмар – 480 м).

Зондування хмарності на малорухомому теплому фронті було виконано в передній його частині на відстані 300 км від лінії фронту. Швидкість руху фронту становила 10-15 км/год. Фронті перешкоджав зміщуватися антициклон, у полі дії якого перебували східні райони України. Два зондування хмар було здійснено над експериментальним метеорологічним полігоном (с. Жовтневе Дніпропетровської обл.) о 13 і 16 год і одне – поблизу м. Дніпропетровськ о 20 год 30 хв. Вертикальне зондування хмар виконано за однаковою методикою; просторові та часові зміни параметрів хмар заради наочності розглянуто у трьох частинах хмарної системи: нижній, середній і верхній (табл. 4).

Зондування хмарної системи Ns-As о 13 і 16 год було виконано в одному й тому самому пункті, тому їх порівняння вказує на зміни хмарності у просторі на малорухомому теплому фронті. Врахувавши напрям і швидкість руху, можна було вважати, що порівняння зондувань о 13 і 20 год 30 хв свідчить про зміни в часі одної й тої самої хмарної маси по відношенню до лінії фронту.



Таблиця 4

Межі хмар (чисельник, м) і їх товщина (знаменник, м) у різних частинах системи Ns-As

Час зондування	Нижня	Середня	Верхня
13 год	470 ÷ 730 / 260	620 ÷ 2010 / 1190	2390 ÷ 3220 / 830
16 год	490 / рівень	1060 ÷ 1460 / 400 1600 ÷ 1930 / 330	2260 ÷ 2640 / 380 2900 ÷ 3230 / 330
20 год 30 хв	640 ÷ 930 / 290	1300 ÷ 1900 / 600	2350 ÷ 2720 / 370 2800 ÷ 3300 / 500

Розглянемо зміни хмарності в часі (через 7 год): а) верхня частина хмарного покриву (As) змінилася мало, верхня межа збільшилася на 2,5% (відповідно 3220 і 3300 м), товщина хмар збільшилася на 5% (830 і 870 м), але утворився безхмарний прошарок завширшки 80 м, б) середня (Ns) та нижня (Frnb) частини хмар зазнали більших змін: у нижній частині збільшилися межі хмар, хоча їх товщина майже не змінилася (відповідно 260 і 290 м); у середній – товщина хмар зменшилася вдвічі (1190 і 600 м). У цілому товщина всієї хмарної системи зменшилася на 23%. Можливо, через блокування антициклоном хмарна система почала руйнуватися. Наведені дані свідчать, що на теплому фронті руйнування хмарної системи починається знизу, верхня частина хмар стійкіша.

Порівняння зондувань о 13 і 16 год указує на просторові зміни фронтального хмарного покриву: видно, що хмарна система розпадається. У нижній частині Frnb переходять у Frst, які залишаються на рівні нижньої межі, але не створюють прошарку. У середній частині підвищується нижня межа і знижується верхня, суцільний раніше шар Ns розпадається на два з меншою сумарною товщиною (відповідно 1190 і 730 м). Верхня частина теж руйнується, але менш помітно, ніж нижня й середня. В As хоча і утворюються два прошарки, але їх загальна товщина зменшилася всього на 14%. Крім того, майже не змінилася верхня межа хмар (відповідно 3220 і 3230 м). Таким чином, зміни хмарного покриву в часі менш суттєві, ніж просторові, за повільним зміщенням фронту.

Визначення просторового розподілу хмар різних форм, дослідження їх еволюції важливі й тому, що останнім часом спостерігали суттєве зменшення кількості хмар. Так, порівняння кількості нижньої (хмари нижнього ярусу, висота яких до 2 км, та вертикального розвитку) і загальної (загальна кількість хмар, які закривають небо, без розподілу на яруси) хмарності за два тридцятирічні періоди, визначені Всесвітньою

метеорологічною організацією (1936-1965 і 1961-1990 рр.), вказує на такі зміни: середня річна кількість як нижньої, так і загальної хмарності зменшилася на всій території України; зменшення нижньої хмарності більш властиве для холодного періоду року (рівень значущості становить 0,01). Порівняння відповідних даних за періоди 1961-1990 і 1991-2005 рр. вказує на подальше зменшення кількості хмар, особливо в холодний період року.

Наведені дані свідчать про певні зміни циркуляційних процесів на території України. Можливою гіпотезою можна назвати послаблення циклонічної діяльності, частіше встановлення малоградієнтного баричного поля. Щоб детальніше визначити причину значущих змін кількості хмар, необхідно дослідити мінливість циркуляційних процесів і виконати статистичну оцінку змін розподілу хмар різних форм.

### **Висновки**

У холодний період року територією України переміщуються атмосферні фронти п'яти типів: теплий, холодний, оклюзії, холодний із хвилями та вторинний холодний. Повторюваність холодного і холодного із хвилями фронтів рівноцінна.

На всіх типах фронтів спостерігали як шаруватоподібні, так і хвилеподібні хмари, але їх співвідношення було різним: на теплих фронтах, холодних із хвилями та фронтах оклюзії повторюваність шаруватоподібних хмар становила близько 60-65%, хвилеподібних – 35-40%, на холодних і вторинних холодних – відповідно близько 40 і 60%.

Відносно висока повторюваність шаруватоподібних хмар перед холодним фронтом напевно зумовлена впливом «теплої несучої смуги», що утворюється поблизу лінії фронту в теплому секторі.

На кожному типі фронту Ns, As, Cs спостерігали в межах усього досліджуваного хмарного покриву, проте найбільша їх повторюваність була поблизу лінії фронту ( $\pm 100$  км), тільки на вторинному холодному фронті – ( $\pm 50$  км).

\* \*

*Определено пространственное распределение облаков различных форм относительно приземной линии фронта по данным самолетного зондирования атмосферы. Выполнен анализ около 2000 облачных систем, наблюдавшихся на атмосферных фронтах, характерных для территории*

*Украины: теплом, холодном, окклюзии, холодном с волнами и вторичном холодном.*

\* \*

1. *Матвеев Л.Т.* О причинах образования облаков // *Метеорология и гидрология* . – 1978. – №8. – С. 25-31.
2. *Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть 11. Вып. 1.* – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 298 с.
3. *Хромов С.П.* Синоптическая метеорология. – М.: Гидрометеиздат, 1940. – 497 с.
4. *Шакина Н.П.* Динамика атмосферных фронтов и циклонов. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 263 с.
5. *Bergeron T.* On the physics of fronts // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* – 1937. – 18. – P. 265-275.

*Український науково-дослідний  
гідрометеорологічний інститут, Київ*