

УДК 551.501.8:551.576

Заболоцька Т.М.¹, Кривобок О.А.¹, Шпиг В.М.¹, Ціла А.Ю.^{1,2}

¹Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, м. Київ

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ЕФЕКТИВНИЙ РАДІУС КРАПЕЛЬ В ХМАРАХ РІЗНИХ ФОРМ ТА ФРОНТАЛЬНИХ ХМАРНИХ СИСТЕМАХ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ У ТЕПЛИЙ ПЕРІОД РОКУ

Ключові слова: ефективний радіус; оптична товщина; водозапас; форми хмар; супутникові виміри.

Вступ. Ефективний радіус хмарних частинок відноситься до важливих мікрофізичних показників, оскільки є індикатором тих процесів, що зумовлюють його зростання, та відповідає за максимальний вклад у водність хмари й відповідно в її водозапас та формування опадів. В [11] на прикладі конвективних хмар показано, що осередки підвищених значень мікрофізичних показників займають декілька відсотків від об'єму хмар, проте на відстані до 10 м можуть змінюватися в десятки разів. Тому дослідження розподілу ефективного радіуса крапель (кристалів) в хмарах основних форм є актуальним.

Вимірювання ефективного радіуса хмарних частинок виконували за літаковим зондуванням хмар, радіолокаційними та супутниковими спостереженнями. Найбільше досліджень було проведено в шарувато-купчастих (Sc) та шаруватих (St) хмарах, бо ці хмари розповсюджуються на великі простори над всією землею, мають високі значення альbedo та сприяють зменшенню випромінювання від земної поверхні. Відбиваність цих хмар залежить від мікрофізичних процесів, що відбуваються в них. Якщо штучно впливати на розподіл крапель, кристалів, їх концентрацію, то зміни оптичних властивостей хмар можуть вплинути на глобальний енергетичний баланс, а значить і клімат.

Виміри ефективного радіуса хмарних частинок виконуються вже декілька десятиліть. Спочатку проводили літакові виміри в теплих хмарах невеликої товщини: шаруваті, шарувато-купчасті, слабо розвинені купчасті (Cu) над морськими просторами за відсутністю впливу аерозолів.

Так, в [18] аналізують ефективний радіус та водність у морських купчастих хмарах без опадів. Відповідні виміри проводили на різних рівнях над нижньою межею хмари. Отримали, що ефективний радіус збільшується по вертикалі в межах від 8 до 15 мкм, більшій водності характерне більше значення ефективного радіуса. В [13] проаналізовано дані супутникових вимірів мікрофізичних параметрів хмар в центральні місяці сезонів впродовж 2-х років на різних широтах земної кулі. Повторюваність значень ефективного радіуса одномодальна з максимумом в межах 9-12 мкм. Авторами виявлено відмінності між континентальними та морськими хмарами двох півкуль, що зумовлено різною концентрацією крапель. У континентальних хмарах радіус крапель на 2-3 мкм менший, ніж у морських, і на 1 мкм менший у морських хмарах північної півкулі порівняно з південною. Відрізняються і вертикальні профілі, концентрації аерозолів. Відмінності у зв'язках між оптичною товщиною і ефективним радіусом вказують на різні мікрофізичні режими в хмарах двох півкуль.

В [9] досліджували теплі шарувато-купчасті хмари як чисті (над морем), так і забруднені. Використовували літакові виміри (63 вертикальні профілі). Концентрація крапель у морських шарувато-купчастих хмарах становила менше 100 см^{-3} , у забруднених – 400 см^{-3} , відповідно ефективний радіус крапель на верхній межі був 12-15 та 5-7 мкм. В [12] оцінювали два варіанти вимірів ефективного радіуса в шаруватих хмарах використовуючи: 1) радіолокаційну відбиваність, 2) інтегровану водність за даними мікрохвильового радіометра та з допущенням, що концентрація крапель в континентальних хмарах 200 см^{-3} , а морських 100 см^{-3} . Порівняння з літаковими вимірами показало, що перший варіант дає кращі результати (стандартне відхилення відповідно становило 13 та 19%).

Були спроби параметризувати виміри ефективного радіуса крапель у шаруватоподібних хмарах відносно водності та концентрації крапель [15], а в [19] було запропоновано теоретичний вираз для середнього значення ефективного радіуса у крапельному прошарку хмари. Цей вираз залежить від концентрації крапель, водності та параметра, що лінійно зв'язує водність на відстані вище нижньої межі.

Під час арктичного дослідження **SCHEBA** [8] ретельно аналізували (літакові та радіолокаційні виміри) еволюцію шарувато-дощових хмар (Ns). Хмари були розшаровані (в кожному з прошарків мікрофізичні показники суттєво різнилися). Верхня межа хмар була нерівною внаслідок затопленої конвекції, просторова структура неоднорідна: осереднена водність могла змінюватися у 8 разів, а ефективний радіус кристалів – від 290 до 320 мкм. Загалом, сумарна водність була $0,15 \text{ г/м}^3$, концентрація всіх хмарних частинок 14200 л^{-1} , кристалів 290 л^{-1} , ефективний радіус хмарних частинок 297 мкм, оптична товщина 26,8. Опади були у вигляді снігу, максимальний розмір сніжинок 3 см. Крапельну фракцію спостерігали у всьому просторі хмар, проте її вклад у загальну водність був малим і не перевищував 10-20%.

Загалом, краплі великих розмірів фіксують у всіх хмарах (крім шаруватоподібних товщиною $\leq 200 \text{ м}$ та купчастих $\leq 500 \text{ м}$), проте їх повторюваність невелика. Шумахер [22] зафіксував в хмарах із середньою водністю 7-12 г/м^3 (зони формування опадів) краплі радіусом 250 мкм. В довіднику [7] також відмічають, що в хмарах помірних широт спостерігають краплі $\geq 100 \text{ мкм}$.

Дослідження мікроструктури купчасто-дощових хмар (Cb) в центральних та тропічних районах США показали, що найбільшу повторюваність мали краплі радіусом 3-4 мкм [23]. Зі збільшенням розмірів крапель їх повторюваність швидко зменшувалася, проте в областях з опадами фіксували краплі радіусом $\geq 100 \text{ мкм}$. Середня концентрація крапель становила $7,2 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$, а водність змінювалася від 4,5 в мало розвинених хмарах до 40 г/м^3 в інтенсивних грозових.

Багато досліджень ефективного радіуса виконано в наковальнях купчасто-дощових хмар в тропічних широтах. Хмари в цих широтах найбільш розвинені і тому суттєво впливають на перенесення у верхні прошарки атмосфери тепла, вологи, що, в свою чергу, впливає на радіаційний режим всієї атмосфери, тобто на клімат. Наковальня є показником переходу потужно-купчастої хмари (Cu cong) в стадію купчасто-дощової (Cb). В наковальнях міститься велика кількість кристалів, що може приводити до помітних локальних змін радіаційного режиму між земною поверхнею та атмосферою. До наковальні відноситься верхня частина хмари, температура якої нижче мінус 40°C . Ця температура відповідає температурі гомогенної кристалізації, тобто практично відбувається повна кристалізація хмари.

Вчені США проводили літакове зондування наковалень в тропіках впродовж 1996-2004 рр. [16, 17] й отримали, що концентрація кристалів у середньому може змінюватися від 5 до 100 см^{-3} , а ефективний радіус в межах 10-50 мкм.

Зараз приділяється увага взаємозв'язку між різними мікрофізичними показниками в хмарі. В [10] аналізували два параметри: DER (ефективний радіус) та LWP (водозапас). Chang та Li розробили алгоритм використання мультиканальних вимірів на 3,7, 2,1 та 1,6 мкм для отримання вертикального профілю DER, щоб поліпшити оцінку LWP. Використовували сумісно **MODIS** та **AMSR-E**, оцінювали розбіжності вимірів на них. Виміри проводили над тропічними океанами між 40° пд.ш. та 40° пн.ш. в теплих хмарах (>273 °K) в межах оптичної товщини 3,6 і 23. Показано, що LWP переоцінюється, коли DER збільшується з висотою в межах хмари, та недооцінюється, коли DER зменшується. Для хмар з дощем DER на верхній межі суттєво менший, ніж DER на нижній. Для хмар без опадів, навпаки, різниця дуже маленька. Розподіл ефективного радіуса одномодальний, максимальне значення для хмар з опадами становить 14-15 мкм, без опадів – 12-13 мкм.

Супутникові виміри мікрофізичних параметрів весь час вдосконалюються. Так, в [16] оцінювали розбіжності у вимірах ефективного радіуса та концентрації крапель. Використовували спектро радіометр (**MODIS**) із різними забірниками: C 5,1 та C 6. Виміри були в теплих хмарах над поверхнею океанів. Для обох забірників піксель був 1°x1°. Спостерігали розбіжності, які можуть впливати на точність кліматологічних даних, отриманих за допомогою **MODIS**, а також на валідацію значень ефективного радіуса та концентрації крапель, що досліджувалися.

За допомогою чисельної одновимірної нестационарної моделі змішаної шаруватоподібної хмари із детальною мікрофізикою, в основу якої покладено систему рівнянь, що описує утворення та еволюцію хмари внаслідок впорядкованих висхідних рухів і трансформаційних змін температури у тропосфері і складається із рівнянь переносу тепла та водяної пари, а також чотирьох кінетичних рівнянь для функцій розподілу крапель і кристалів (голки, пластинки та стовпчики), досліджувався вплив мікрофізики хмар на оптичну товщину хмар та відбиваність хмарності [1]. Зокрема, зазначається, що відновлення ефективного радіуса хмарних часток є необхідною умовою для відновлення оптичної товщини хмар за експериментальними значеннями відбиваності у різних каналах радіометра AVHRR супутників серії NOAA. Сам же ефективний радіус є дуже чутливим до фазового складу, оскільки його величина у рідкокрапельних хмарах має порядок від декількох до десятків мкм, у той же час у кристалічних хмарах – сотень мкм [1].

На сьогодні накопичені дані про мікрофізичні показники в хмарах різних форм потребують подальшого дослідження, проте їх вже використовують в глобальних моделях. Так, в [21] аналізували використання супутникової (оптична товщина, ефективний радіус) та радіолокаційної (профіль відбиваності) інформації в моделі загальної циркуляції атмосфери (GCM) для оцінки наявності опадів.

Мета даного дослідження – визначити ефективний радіус крапель на верхній межі як окремих форм хмар, так і хмарних систем, що зумовлюють сильні опади в теплий період року; оцінити залежність ефективного радіуса від оптичної товщини, водозапасу та висоти верхньої межі.

Методика дослідження. В даній роботі ефективний радіус крапель визначали на верхній межі хмар різних форм (за даними 2014-2015 рр.), ізольованих купчасто-дощових хмар (за вимірами, які виконувалися у м. Київ впродовж квітня-вересня 2014 р.) та потужних хмарних систем, що зумовлювали сильні опади в 2014-2015 рр. Для цього використовували розраховані щогодинні значення ефективного радіуса крапель, оптичної товщини, водозапасу та верхньої межі хмар за даними супутника MSG [4, 14] та інформацію про тривалість (T, год), кількість (Q, мм) та інтенсивність (I, мм/год) опадів на 40 станціях наземної метеорологічної мережі, більш-менш рівномірно розташованих на території України.

Результати дослідження. Взаємозв'язок між значеннями ефективного радіуса крапель та водністю. За результатами аналізу даних супутникових вимірів щодо ефективного радіуса крапель на рівні верхньої межі хмар, проведених в Україні в 2014-2015 рр., було оцінено найбільш характерні значення ефективного радіуса для основних форм хмар (табл. 1).

Як свідчать дані таблиці, для всіх форм хмар ефективний радіус крапель, тобто радіус крапель, що вносять найбільший вклад у водність, становить 6 мкм. У St й As таких крапель 100%, у Sc та Ac – 91-92%. Різниця між цими хмарами в тому, що в Ac іноді формують водність (десята частина таких хмар) і більш крупні краплі (8 мкм), а у Sc таких хмар значно менше (4%), проте існують і хмари з ефективним радіусом у 4 мкм (4%). Ефективний радіус у Ns й Cb також переважно складає 6 мкм (відповідно 71 та 89%). Більш крупні краплі (8 мкм) у Ns фіксували у третини хмар (29%), а у Cb у кожній десятій хмарі (9%). Проте у Cb, що супроводжувалися зливами й сильними грозами, ефективний радіус складав 10-15 (1,5%) та 25-45 (0,5%) мкм.

Таблиця 1. Повторюваність (%) ефективного радіуса крапель на верхній межі основних форм хмар

Форма хмар	Ефективний радіус, мкм				
	4	6	8	10-15	20-45
St		100			
Sc	4	92	4		
Ac		91	9		
As		100			
Ns		71	29		
Cb		89	9	1,5	0,5

Примітка. St – шаруваті, Sc – шарувато-купчасті, Ac – високо-купчасті, As – високо-шаруваті, Ns – шарувато-дощові, Cb – купчасто-дощові хмари

За спостереженнями в Києві впродовж квітня-вересня 2014 р. було визначено ефективний радіус крапель у випадках, коли на небосхилі спостерігали єдину форму хмар, а саме, купчасто-дощові хмари (табл. 2).

Таблиця 2. Повторюваність (%) ефективного радіуса крапель на верхній межі купчасто-дощових хмар з різною оптичною товщиною

Ефективний радіус, мкм	Оптична товщина					
	4	10	20	40	100	200
6	40	19	12	1		
8	20	4	1		1	
≥10			1			1

Виконано 89 вимірів й отримано: а) для визначеного за даними спостережень діапазону коефіцієнтів оптичної товщини (від 4 до 200) найбільшу повторюваність (72%) мав ефективний радіус 6 мкм. Практично вдвічі (2,4 рази) рідше фіксували краплі з ефективним радіусом 8 мкм (26%) і значно рідше ≥10 мкм (2%), б) найчастіше краплі з ефективними радіусами 6 та 8 мкм спостерігали за значеннями коефіцієнта оптичної товщини 4 (відповідно 40 та 20 %). Краплі розміром 6 мкм спостерігали у широкому діапазоні коефіцієнтів оптичної товщини (від 4 до 20, іноді 40), в той час як краплі у 8 мкм переважно від 4 до 10 й епізодично за більшими значеннями (20 чи навіть 100). Краплі розміром ≥10 мкм фіксували не часто, проте за більшими значеннями оптичної товщини (20, 200).

Впродовж досліджуваного періоду (квітень-вересень 2014 р.) був зафіксований 41 випадок з опадами із купчасто-дощових хмар. Згідно Настанови [6], 20% з них

були помірними опадами ($I = >0.17-0.50$ мм/год), 51% – сильними ($I = >0.50-1.58$ мм/год) й 29% дуже сильними ($I = >1.58$ мм/год). Для даної вибірки інтенсивність помірних опадів в середньому становила 0,34 мм/год, сильних – 0,97 мм/год, дуже сильних – 6,26 мм/год. Взаємозв'язок розмірів ефективного радіуса крапель та водозапаса купчасто-дощових хмар з інтенсивністю опадів представлено в табл. 3 а, б.

Таблиця 3. Повторюваність (%) ефективного радіуса крапель на верхній межі купчасто-дощових хмар (а) та водозапаса (б) за наявності опадів різної інтенсивності

Ефективний радіус, мкм (а) та водозапас, г/м ² (б)	Характеристика та інтенсивність опадів, мм/год		
	помірні, $>0.17-0.50$	сильні, $>0.50-1.58$	дуже сильні, >1.58
а)			
6	75	33	-
8	25	62	75
≥ 10	-	5	25
б)			
17-35	62	-	-
35-70	38	59	-
70-150	-	32	83
150-270	-	5	-
270-400	-	4	9
....	-	-	-
2500-5000	-	-	8

Три чверті випадків з помірними опадами були сформовані краплями з ефективним радіусом 6 мкм (75%) й одна чверть (25%) – 8 мкм. В утворенні сильних опадів більшу повторюваність мали краплі з ефективним радіусом 8 мкм (62%), проте у кожному третьому випадку – 6 мкм (33%), більш крупні краплі (≥ 10 мкм) мали незначну повторюваність (5%). Ефективний радіус крапель в дуже сильних опадах був переважно 8 мкм (75%), значно рідше (25 %) спостерігали більш крупні краплі (10, 15 та 30 мкм), табл. 3 а.

В хмарах з помірними опадами переважав водозапас у 17-35 г/м² (62 %), проте у третини хмар (38 %) він був вдвічі більший (35-70 г/м²). У хмарах з сильними опадами найчастіше запас вологи складав 35-70 г/м² (59 %) та третина хмар (32 %) мала 70-150 г/м². Також у хмарах з сильними опадами значно рідше (9 %) фіксували водозапас у межах 150-400 г/м². Хмари з дуже сильними опадами здебільшого (83 %) мали запас вологи у 70-150 г/м², а іноді (9 %) до 400 чи навіть 2500 г/м² (8%), табл. 3 б.

Наведені дані підтверджують висновок, що, чим інтенсивніше опади, тим більша повинна бути водність в хмарі й відповідно більші значення ефективного радіуса.

Розподіл ефективного радіуса в потужних хмарних системах, що спричиняють сильні опади. З 26 до 31 травня 2015 р. фіксували сильні зливи, грози, на Правобережжі – град. Загалом випала місячна сума опадів. Головна причина – блокування улоговини, що поширилася від Північного моря до Африки. Блокування було спричинене розвитком антициклогенезу: замкнутого антициклону на заході відносно улоговини та потужного гребеня над Поволжям, який стрімко зміщувався у північному напрямі, охоплюючи територію Східної Європи. У південній частині улоговини, що була відокремлена від замкнутого центра, утворився вторинний циклон. Спочатку зливи та грози були зумовлені дією холодної гілки з хвилями системи II, потім центри хвиль глобальних фронтальних систем I та II, особливості яких детально описані у [2, 3], прийняли меридіональну паралельну

орієнтацію та зблизилися між собою (до 40 км), що сприяло збільшенню баричних та термічних градієнтів.

Загалом, для аналізу як поля опадів, так і мікрофізичних показників у синоптичній ситуації 26-31.05.2015 р. було залучено дані 40 метеорологічних станцій, більш менш рівномірно розташованих на території України. Опади вимірювали цілодобово (кожні 6 год), проте мікрофізичні показники тільки у денну пору (06-16 ВСЧ). В даному випадку сильні опади, згідно [6], майже рівнозначно фіксували в нічний та денний час (відповідно 50 та 58%), а дуже сильні частіше відмічали вночі, ніж вдень (10 проти 3%).

Опади (переважно зливи) фіксували на всій території України, спочатку 26-28.05. на заході, далі 27-29.05. в центрі та на півдні й 27-31.05.2015 на сході та півночі. Загальна кількість змінювалася від < 10 до > 90 мм. Розподіл був таким: до 20 мм (28%), 21-40 мм (48%), 41-60 мм (16%), 61-100мм (8%). Максимальна кількість за 6 год змінювалася від < 10 до 40 мм, відповідно: < 10 мм (28%), 11-20 мм (52%), 21-30 мм (12%), 31-40 мм (8%).

Найінтенсивніші опади були в різних регіонах. Наприклад, за 6 год випало: у Закарпатті (Ужгород – 24,5 мм, Рахів – 22,1 мм), на заході (Львів – 20 мм), в центрі (Черкаси – 18 мм), на півдні (Херсон – 33,3 та 30 мм) на сході (Гадяч 28 мм) й на півночі (Суми 38,4 мм).

В табл. 4 наведено розподіл ефективного радіуса крапель на верхній межі хмар залежно від її висоти за 170 вимірами впродовж 26-31.05.2015 р.

Таблиця 4. Повторюваність (%) ефективного радіуса крапель на верхній межі хмар залежно від її висоти

Ефективний радіус, мкм	Верхня межа хмар, км		
	≤ 5	>5...<9	9-14
6	29	21	15
8	8	10	11
≥ 10	1,5	1	3,5

Виділено три групи хмар: 1) верхня межа в межах < 5 км, 2) >5...< 9 км, 3) 9-14 км. Основні результати такі: на верхній межі хмар спостерігали ефективний радіус крапель в межах 6-45 мкм; найчастіше фіксували ефективний радіус крапель розміром 6 мкм (65% всієї вибірки); повторюваність ефективного радіуса крапель розміром 6 мкм зменшується зі збільшенням верхньої межі, відповідно 29, 21, 15 %; повторюваність ефективного радіуса крапель розміром 8 мкм, навпаки, збільшується, хоча й незначно, зі зростанням висоти верхньої межі, відповідно 8, 10, 11 %; більші розміри ефективного радіуса крапель (10, 15, 20, 45 мкм) фіксували епізодично на різних висотах, найчастіше в хмарах з верхньою межею 9-14 км. Загалом їх повторюваність незначна (6 %).

Взаємозв'язок розмірів ефективного радіуса крапель з водозапасом хмарних систем та інтенсивністю опадів 28.05.2015 р. представлено в табл. 5 а, б.

У помірних опадах максимальну повторюваність мали краплі з ефективним радіусом 6 мкм (86%), значно рідше спостерігали краплі з радіусом 8 мкм (14 %). У сильних опадах також найчастіше фіксували краплі з ефективним радіусом 6 мкм (71 %), проте вдвічі збільшилася повторюваність крапель 8 мкм (29 %). Більш широкий діапазон ефективного радіуса крапель (6-45 мкм) відмічали у дуже сильних опадах, максимальну частоту мали краплі з ефективним радіусом 8 мкм (56 %). Крупні краплі (10, 15, 20, 45 мкм) спостерігали рідше (2 %).

За наведеними даними чітко прослідковується збільшення водозапасу хмар для можливості формування опадів підвищеної інтенсивності. Для утворення помірних опадів достатньо водозапасу в межах 17-35/35-70 г/м² (78%), сильних та

дуже сильних 35-70/70-150 г/м² (відповідно 69 та 81%). Із хмар з водозапасом >150 г/м² випадали тільки сильні й дуже сильні опади (відповідно 8 та 11%).

Таблиця 5. Повторюваність (%) значень ефективного радіуса крапель на верхній межі хмар (а) та водозапасу (б) залежно від інтенсивності опадів

Ефективний радіус, мкм (а) та водозапас, г/м ² (б)	Характеристика та інтенсивність опадів, мм/год		
	помірні, >0,17-0,50	сильні, >0,50-1,58	дуже сильні, >1,58
а)			
6	86	71	42
8	14	29	56
≥10	–	–	2
б)			
17-35	34	23	8
35-70	44	33	38
70-150	22	36	43
150-270		2	3
270-400		2	4
>400		4	4

В другій синоптичній ситуації 25-29.06 2015 р. сильні опади також були зумовлені дією блокуючого процесу. Глобальні фронтальні системи наблизилися одна до одної, що призвело до загострення центрів хвиль та утворення декількох приземних замкнених циклонічних центрів. Опади охоплювали всю територію України, найбільш інтенсивні на Лівобережжі, в деяких місцях вони були катастрофічні: в Запоріжжі за 2 год випало 65,7 мм, в Гадячі за 30 хв – 10,2 мм. Відповідні дані про ефективний радіус крапель, водозапас та інтенсивність опадів наведено в табл. 6 а, б.

Таблиця 6. Повторюваність (%) ефективного радіуса крапель та водозапасу залежно від інтенсивності опадів у синоптичній ситуації 25-29.06 2015 р.

Ефективний радіус, мкм (а), водозапас (б)	Характеристика та інтенсивність опадів, мм/год		
	помірні, >0,17-0,50	сильні, >0,50-1,58	дуже сильні, >1,58
а)			
6	100	47	39
8	-	40	44
≥ 10		13	17
б)			
17-35	60	29	15
35-70	40	41	38
70-150	-	24	33
150-270	-	6	10
270-400			2
600-1000			2

Ефективний радіус крапель, що зумовили помірні опади, становив 6 мкм, а водозапас був в межах 17-70 г/м²: 17-35 (60%) та 35-70 г/м² (40%). Відмінності в значеннях ефективного радіуса крапель у сильних та дуже сильних опадах проявляються в меншій повторюваності крапель розміром 6 мкм (на 12%), проте більший з радіусом у 8 та ≥ 10 мкм (відповідно на 11 та 13%). Водозапаси більш суттєво відрізнялися: повторюваність водозапасу 17-35 г/м² у дуже сильних опадах була вдвічі меншою (29 та 15%), 35-70 г/м² – майже однакова (41 та 38%), а водозапаси 70-150 та 150-270 г/м² мали більшу повторюваність у дуже сильних

опадів (на 17%). Також у дуже сильних опадах фіксували водозапаси в межах 400-1000 г/м² (4%).

При випадінні сильних та дуже сильних опадів в просторі фронтальних хмарних систем фіксують осередки-конгломерати, які складаються з декількох, менших за розміром, осередків зі значно більшими значеннями мікрофізичних показників. Наприклад, 28.05.2015 р. через Сумську область з півдня на північ (Гадяч → Білопіль) зміщувався осередок площею ~6000 км², на зовнішніх межах якого по всьому периметру ефективний радіус становив 8 мкм, а в середині він складався з невеликих осередків з різними значеннями ефективного радіуса, таких як 15, 20, 40, 45 мкм. Інший випадок спостерігали 10.05.2014 р., в Черкаській обл. Осередок (як і в попередньому випадку) мав форму, близьку до еліпса, і в його просторі площею ~4000 км² відмічали невеликі осередки з ефективним радіусом 8, 10, 15, 25, 40, 45 мкм. Загалом, згущення та розрідження крапель є природнім станом, властивим хмарам [7].

Як в першому, так і в другому випадку було визначено інтенсивність опадів та мікрофізичні показники на всіх навколишніх станціях: 28.05.2015 р. (Гадяч, Ромни, Лебедин, Суми) та 10.05.2014 р. (Умань, Жашків, Звенигородка, Сміла, Чигирин, Золотоноша, Канів). Станції Сумської обл. фіксували опади тривалістю в межах 0,20-3,47 год, кількістю 0,4-27,7 мм, інтенсивністю 1,49-7,98 мм/год. На станціях Черкаської обл. відмічали опади тривалістю від 0,4 до 6,0 год, кількістю в межах 0,1-8,7 мм та інтенсивністю відповідно 0,04-4,66 мм/год, табл. 7, 8.

Таблиця 7. Метеорологічні (кількість, тривалість, інтенсивність) та мікрофізичні (ефективний радіус, оптична товщина, водозапас) показники 28.05.2015 р., Сумська обл.

Станція	Період випадіння	Q, мм	T, год	I, мм/год	еф. рад., мкм	оп. тов.	LWP, г/м ²
Гадяч	06-12	1,0	0,67	1,49	8	10	35-70
	12-18	27,7	3,47	7,98	6, 8	20	70-150
Ромни	12-18	3,4	1,50	2,27	6	10	35-70
Лебедин	06-12	0,4	0,20	2,00	8	4	17-35
	12-18	2,9	1,55	1,87	8,15,6	10	35-70
Суми	12-18	13,3	2,00	6,65	8	20	70-150

Таблиця 8. Метеорологічні (кількість, тривалість, інтенсивність) та мікрофізичні (ефективний радіус, оптична товщина, водозапас) показники 10.05. 2014 р., Черкаська обл.

Станція	Період випадіння	Q, мм	T, год	I, мм/год	еф. рад., мкм	оп. тов.	LWP, г/м ²
Умань	06-12	8,5	5,6	1,52	6	20,10	70-150, 35-70
	12-18	2,2	2,25	0,98	6	10,20	35-70, 70-150
Жашків	06-12	8,7	6,0	1,45	8,6	20	70-150
	12-18	2,9	2,9	1,00	6	10	35-70
Звенигородка	06-12	4,1	3,85	1,06	6	20	70-150
	12-18	6,2	1,33	4,66	8,6	20, 60	70-150, 270-400
Сміла	06-12	1,0	0,6	1,67	8	40	150-270
	12-18	0,1	2,33	0,04	8	4, 10	17-35, 35-70
Чигирин	00-06	7,0	4,4	1,59	6	20	70-150
	06-12	0,4	0,4	1,0	6	10	35-70
Золотоноша	06-12	2,4	1,17	2,05	25,30	20,40	70-150, 150-270
	12-18	0,3	1,4	0,21	6	4, 10	17-35, 35-70
Канів	06-12	5,4	1,4	3,86	8	40,60	150-270, 270-400
	12-18	4,3	1,6	2,69	6	10	35-70

Дані таблиць свідчать, що, хоча конгломерати-осередки не перетинали станції (крім метеостанції Звенигородка), зі зростанням інтенсивності опадів певною мірою збільшуються значення мікрофізичних показників. Так, у сильних опадах переважав ефективний радіус 6 мкм й водозапас 35-70 г/м², а в дуже сильних – рівнозначно 6 та 8 мкм, іноді – 15, 25, 30 мкм й водозапас найчастіше 70-150 і навіть в межах 150-400 г/м². На метеостанції Звенигородка фіксували найбільш інтенсивні опади (4,7 мм/год), ефективний радіус – 8 мкм, водозапас – 270-400 г/м².

Слід зазначити, що при проходженні через територію України фронтальних хмарних систем фіксують (не часто) подібні конгломерати. Більш за все вони розповсюджуються смугами. Повністю прослідити зв'язок відповідних значень ефективного радіуса крапель в конгломераті з інтенсивністю опадів на станціях, над якими він зміщується, складно через їх рідку мережу. Наведемо приклад 07.08.2016 р. Конгломерат-осередок мав форму смуги, розповсюдженої з південного заходу на північний схід, довжиною близько 200-250 км та змінною шириною (в межах 15-30 км). В цій смузі досить щільно були зосереджені невеликі осередки з ефективним радіусом 8, 10, 15, 20, 30, 40, 45 мкм. Відповідно верхня межа хмар була в межах 7-14 км, а водозапас від 150 г до ≥10 кг на 1м². Опади, в просторі смуги, були зафіксовані в Одесі та на метеостанції Долинська. В Одесі за 2,3 год випало 55,4 мм опадів з середньою інтенсивністю ~24 мм/год (дуже сильні опади тривали 1 год 7 хв і в цей час інтенсивність була значно більшою). На метеостанції Долинська за 1 год 5 хв випало 10,3 мм інтенсивністю 9,5 мм/год. Формування цих опадів відбувалося за значеннями ефективного радіуса у 40, 45 мкм (Одеса) та 20 мкм (Долинська). Відповідні значення водозапасу були ≥10 кг/м² та 400-600 г/м². Наведені дані свідчать про надзвичайно складні механізми інтенсивного опадоутворення. Можливо, ці смуги підвищених значень мікрофізичних показників є зонами конвергенції, причини утворення яких в межах хмарних систем потребують дослідження.

Висновки. За результатами дослідження вперше для території України було визначено ефективний радіус крапель на верхній межі основних форм хмар. Показано, що найбільш поширеними значеннями ефективного радіуса крапель є 6 та 8 мкм. Визначено взаємозв'язок ефективного радіуса крапель з висотою, оптичною товщиною, водозапасом хмар та інтенсивністю опадів. Виявлено, що у випадках, коли опади охоплюють велику площу (близько 50% і більше території України), мають місце так звані “хмарні конгломерати” – утворення із підвищеними значеннями мікрофізичних показників (по відношенню до всього хмарного поля), які переважно мають форму смуг та зумовлюють дуже сильні опади.

Список літератури

1. Дорман Б.А., Баханов В.П., Манжара А.А. Микрофизические и оптические характеристики фронтальных смешанных облаков (результаты численного моделирования) // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту, 2010. Вип. 259. С. 74-90.
 2. Заболоцька Т.М., Шпиг В.М. Трансформація баричного поля та хмарності у випадку тривалих і сильних опадів // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту, 2014. Вип. 266. С. 12-19.
 3. Заболоцька Т.М., Шпиг В.М. Синоптичні умови утворення стихійних явищ погоди на території України. Частина I // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2018. №1 (48). С. 57-67.
 4. Кривобок А. Новые возможности приема цифровой спутниковой информации через систему EUMETCAST // Український гідрометеорологічний журнал, 2008. №3. С. 25-32.
 5. Королев А.В., Мазин И.П. Зоны сгущения и разрежения капель в облаках слоистых форм // Метеорология и гидрология, 1990. № 8. С. 55-63.
 6. Наставление по службе прогнозов. Раздел 2. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 56 с.
 7. Облака и облачная атмосфера (справочник) / Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
 8. Синькевич А.А., Матросов С.Ю. Строение арктического слоисто-дождевого облака по данным самолетных
- ISSN:2306-5680 Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2020. № 1 (56)

и радиолокационных измерений // *Метеорология и гидрология*, 2008. № 10. С. 34-51. **9.** Brengular J.-L., Pawlowska H., Schuller L., Hreusker R., Fischer J., Fouquart Y. Radiative Properties of Boundary Layer Clouds: Droplet Effective Radius versus Number Concentration // *J. Atmos. Sci.* 2000. Vol. 57. P. 803-821. **10.** Chen R., Chang F.-L., Li Sh., Ferraro R., Weng F. Impact the Vertical Variation of Cloud Droplet Size on the Estimation of Cloud Liquid Water Path and Rain Detection // *Journal of the Atmospheric Sciences (Special Section)*. 2007. Vol. 64. P. 2843-2853. **11.** Draginis M. Liquid-water within convective clouds // *J. Met.* 1958. Vol.15, № 6. P.481-485. **12.** Frish S., Shupe M., Djalalova I., Feincol G., Pollot M.Y. The Retrieval of Stratus Cloud Droplet Effective Radius with Cloud Radars // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. Vol. 19. P. 835-842. **13.** Han Q., Roscow W.B., Lacis A.A. Near Global Survey of Effective Droplet Radii in Liquid Water Clouds using ISCCP Data // *J. Climate*. 1994. Vol. 7. P. 465-497. **14.** Kryvobok O.A. Monitoring characteristics of young convective clouds using MSG data// *Meteo-France, Toulouse. Visiting Scientist Report*. 30 January 2005. P. 49. **15.** Martin G.M., Johnson D.W., Spice A.J. The Measurement and Parametrization of Effective Radius of Droplets in Warm Stratocumulus Clouds // *J. Atmos. Sci.* 1994. Vol. 51, № 13. P. 1823-1842. **16.** McFarquar G., Heymsfield A. Microphysical characteristics of three anvils sampled during the Central Equatorial Pacific Experiment // *J. Atmos. Sci.* 1996. Vol. 53. P. 2401-2423. **17.** Poellot M., Kucera P., Heymsfield A. et al. A case study of tropical cirrus anvil microphysics from CRYSTAL-FACE // *In Proc. Int. Conf. on Clouds and Precipitation, Bolonga, 2004*. **18.** Pontikis C.A., Hicks E.M. The Influence of Clear Air Entrainment in the Droplet Effective Radius of Warm Maritime Convective Clouds // *J. Atmos. Sci.* 1993. Vol. 50, № 17. P. 2889-2900. **19.** Pontikis C.A. Parametrization of the droplet radius of warm layer clouds // *Physical Research Letters*. 1996. Vol. 23, № 19. P. 2629-2632. **20.** Rausch J., Meyer K., Bennartz R., Platnick St. Differences in liquid cloud droplet effective radius and number concentration estimates between MODIS collections 5,1 and 6 over global oceans // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2017. Vol. 10. P. 2105-2116. **21.** Song H., Zhang Z., Ma P.-L., Chan S., Wang M. The importance considering sub-grid cloud variability when using satellite observations to evaluate the cloud and precipitation simulations a climate models // *Geosci. Model Dev*. 2018. Vol. 11. P. 3147-3158. **22.** Schumacher P.W. Free water in high altitudes // *J. Aircraft*. 1964. Vol. 1, № 1. P. 46-48. **23.** Weickmann H.K. Kampe H.J. Physical properties of cumulus clouds // *J. Met.* 1953. Vol. 10, № 3. P. 204-211.

Reference

1. Dorman B.A., Bahanov V.P., Manzhara A.A. Mikrofizicheskie i opticheskie harakteristiki frontal'nyh smeshannyh oblakov (rezul'taty chislennoho modelirovaniya) // *Naukovi praci Ukraïns'kogo naukovo-doslidnogo gidrometeorologichnogo institutu*, 2010. Vip. 259. S. 74-90. **2.** Zabolots'ka T.M., Shpyh V.M. Transformatsiia barychnoho polia ta khmarnosti u vypadku tryvalykh i syl'nykh opadiv // *Naukovi pratsi Ukraïns'koho naukovo-doslidnogo hidrometeorologichnogo instytutu*, 2014. Vyp. 266. S. 12-19. **3.** Заблоцька Т.М., Шпиг В.М. Синоптичні умови утворення стихійних явищ погоди на території України. Частина I // *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2018. №1 (48). С. 57-67. **4.** Krivobok A. Novye vozmozhnosti priema cifrovoj sputnikovoj informacii cherez sistemu EUMETCAST // *Ukraïns'kij gidrometeorologichnij zhurnal*, 2008. №3. S. 25-32. **5.** Korolev A.V., Mazin I.P. Zony sgushhenija i razrezhenija kapel' v oblakah sloistykh form // *Meteorologija i gidrologija*, 1990. № 8. S. 55-63. **6.** *Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 2. L.: Gidrometeoizdat*, 1981. 56 s. **7.** Oblaka i oblachnaja atmosfera (spravochnik) # Pod red. I.P. Mazina, A.H. Hrgiana. L.: Gidrometeoizdat, 1989. 647 s. **8.** Sin'kevich A.A., Matrosov S.Ju. Stroenie arkticheskogo sloisto-dozhdevogo oblaka po dannym samoletnyh i radiolokacionnyh izmerenij // *Meteorologija i gidrologija*, 2008. № 10. S. 34-51. **9.** Brengular J.-L., Pawlowska H., Schuller L., Hreusker R., Fischer J., Fouquart Y. Radiative Properties of Boundary Layer Clouds: Droplet Effective Radius versus Number Concentration // *J. Atmos. Sci.* 2000. Vol. 57. P. 803-821. **10.** Chen R., Chang F.-L., Li Sh., Ferraro R., Weng F. Impact the Vertical Variation of Cloud Droplet Size on the Estimation of Cloud Liquid Water Path and Rain Detection // *Journal of the Atmospheric Sciences (Special Section)*. 2007. Vol. 64. P. 2843-2853. **11.** Draginis M. Liquid-water within convective clouds // *J. Met.* 1958. Vol.15, № 6. P.481-485. **12.** Frish S., Shupe M., Djalalova I., Feincol G., Pollot M.Y. The Retrieval of Stratus Cloud Droplet Effective Radius with Cloud Radars // *J. Atmospheric and Oceanic Technology*. 2002. Vol. 19. P. 835-842. **13.** Han Q., Roscow W.B., Lacis A.A. Near

Global Survey of Effective Droplet Radii in Liquid Water Clouds using ISCCP Data // J. Climate. 1994. Vol. 7. P. 465-497. **14.** Kryvobok O.A. Monitoring characteristics of young convective clouds using MSG data// Meteo-France, Toulouse. Visiting Scientist Report. 30 January 2005. P. 49. **15.** Martin G.M., Johnson D.W., Spice A.J. The Measurement and Parametrization of Effective Radius of Droplets in Warm Stratocumulus Clouds // J. Atmos. Sci. 1994. Vol. 51, № 13. P. 1823-1842. **16.** McFarquar G., Heymsfield A. Microphysical characteristics of three anvils sampled during the Central Equatorial Pacific Experiment // J. Atmos. Sci. 1996. Vol. 53. P. 2401-2423. **17.** Poellot M., Kucera P., Heymsfield A. et al. A case study of tropical cirrus anvil microphysics from CRYSTAL-FACE // In Proc. Int. Conf. on Clouds and Precipitation, Bologna, 2004. **18.** Pontikis C.A., Hicks E.M. The Influence of Clear Air Entrainment in the Droplet Effective Radius of Warm Maritime Convective Clouds // J. Atmos. Sci. 1993. Vol. 50, № 17. P. 2889-2900. **19.** Pontikis C.A. Parametrization of the droplet radius of warm layer clouds // Physical Research Letters. 1996. Vol. 23, № 19. P. 2629-2632. **20.** Rausch J., Meyer K., Bennartz R., Platnick S. Differences in liquid cloud droplet effective radius and number concentration estimates between MODIS collections 5,1 and 6 over global oceans // Atmospheric Measurement Techniques. 2017. Vol. 10. P. 2105-2116. **21.** Song H., Zhang Z., Ma P-L, Chan S., Wang M. The importance considering sub-grid cloud variability when using satellite observations to evaluate the cloud and precipitation simulations a climate models // Geosci. Model Dev. 2018. Vol. 11. P. 3147-3158. **22.** Schumacher P.W. Free water in high altitudes // J. Aircraft. 1964. Vol. 1, № 1. P. 46-48. **23.** Weickmann H.K. Kampe H.J. Physical properties of cumulus clouds // J. Met. 1953. Vol. 10, № 3. P. 204-211.

Ефективний радіус крапель в хмарах різних форм та фронтальних хмарних системах за даними супутникових спостережень у теплий період року

Заболоцька Т.М., Кривобок О.А., Шпиг В.М., Ціла А.Ю.

Визначено та проаналізовано розподіл ефективного радіуса крапель на верхній межі основних форм хмар над територією України за супутниковими спостереженнями впродовж 2-х років (2014-2015 рр.). Значення ефективного радіуса на верхній межі ізольованих купчасто-дощових хмар та його зв'язок з оптичною товщиною оцінено за вимірами в Києві впродовж квітня-вересня 2014 р. Для тих випадків, коли купчасто-дощові хмари спричиняли опади, визначено залежність ефективного радіуса крапель від типу опадів та їх інтенсивності, а також оцінено зв'язок між водозапасом цих хмар та інтенсивністю опадів. Розподіл ефективного радіуса крапель в хмарах потужних фронтальних систем, що зумовили опади на всій території країни, було визначено в двох синоптичних ситуаціях та оцінено його залежність від висоти верхньої межі, типу та інтенсивності опадів, водозапасу хмар. Проаналізовано випадки наявності в хмарних системах ізольованих осередків у вигляді смуг із щільно згрупованими різними, проте підвищеними, значеннями ефективного радіуса, що зумовлювали сильні опади.

Ключові слова: ефективний радіус; оптична товщина; водозапас; форми хмар; супутникові виміри.

Эффективный радиус капель в облаках различных форм и фронтальных облачных системах по данным спутниковых наблюдений в теплый период года

Заболоцкая Т.Н., Кривобок А.А., Шпиг В.М., Цила А.Ю.

Определено и проанализировано распределение эффективного радиуса капель на верхней границе основных форм облаков над территорией Украины в течение 2-х лет (2014-2015 гг.). Значения эффективного радиуса на верхней границе изолированных кучево-дождевых облаков и его связь с оптической толщиной оценены по измерениям в Киеве в течение апреля-сентября 2014 г. Для тех случаев, когда кучево-дождевые облака сопровождалась осадками, определена зависимость эффективного радиуса капель от типа осадков и их интенсивности, а также оценена связь между водозапасом этих облаков и интенсивностью осадков. Распределение эффективного радиуса капель в облаках мощных фронтальных систем, обуславливающих осадки на всей территории страны, было определено в двух синоптических ситуациях и оценена его зависимость от высоты верхней границы и водозапаса облаков, а также от типа и интенсивности осадков. Проанализированы случаи наличия в облачных системах изолированных очагов, в виде полос, с плотно сгруппированными различными, но повышенными, значениями эффективного радиуса, обуславливающие сильные осадки.

Ключевые слова: эффективный радиус; оптическая толщина; водозапас; форма облаков; спутниковые измерения.

Drop effective radius in main cloud types and frontal cloud systems estimated by satellite observations in warm period of year

Zabolotska T.M., Kryvobok O.A., Shpyg V.M., Tsila A.Yu.

The distribution of drop effective radius on cloud upper level was defined and analyzed for main cloud forms over Ukraine during two years (2014-2015) using satellite observations. The effective radius values of isolated cumulonimbus on cloud top and its dependency on optical thickness was estimated in measurements during April-September 2014 over Kyiv area. For cumulonimbus clouds with precipitation the dependence of effective radius on the type, precipitation intensity and liquid water path was defined. The distribution of drop effective radius on cloud top in the strength frontal systems with heavy showers area over all territory of Ukraine was defined for two systems and its dependence on the cloud height and the precipitation type, their intensity and the liquid water path was estimated. For all types of clouds the size of effective radius of the droplets was $6\text{ }\mu\text{m}$. In St and As cloud system droplets with this size of effective radius were observed in 100%, in Sc and As cloud system - 91-92%. The values of effective radius in Ns and Cb cloud system was close to $6\text{ }\mu\text{m}$ (71 and 89% respectively). Larger droplets ($8\text{ }\mu\text{m}$) in Ns were observed in 29% and in Cb in 9%. However, in Cb, accompanied by rainfalls and powerful thunderstorms, the values of effective radius were $10\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$ (1.5%) and $25\text{--}45\text{ }\mu\text{m}$ (0.5%). In 75% of moderate precipitation cases were formed by drops with an effective radius of $6\text{ }\mu\text{m}$ and in 25% with an effective radius of $8\text{ }\mu\text{m}$. For the heavy precipitated clouds, the drops with an effective radius of $8\text{ }\mu\text{m}$ (62%) had the highest frequency, in 33% the effective radius of $6\text{ }\mu\text{m}$ were observed. The larger droplets ($\geq 10\text{ }\mu\text{m}$) had a small frequency (5%). The drop effective radius for cases of heavy rainfalls was $8\text{ }\mu\text{m}$ in 75%, in 25% larger droplets were observed ($10, 15$ and $30\text{ }\mu\text{m}$). More intense rainfall was accompanied by greater values of cloud water content and, accordingly, greater effective radius values. The cases with large values of microphysical parameters and precipitation were observed as streaks in frontal cloud systems.

Keywords: effective radius; optical thickness; liquid water path; cloud forms; satellite measurements.

Надійшла до редколегії 10.12.2019

УДК 551.574.42

Пясецька С.І., Савчук С.В., Тимофеев В.Є.

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, м. Київ

**ПОБУДОВА ФУНКЦІЇ ЛІНІЙНОГО ДИСКРИМІНАНТНОГО АНАЛІЗУ ТА ЇЇ
ОЦІНКА ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ЯВИЩ
(ОЖЕЛЕДЬ) НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ**

Ключові слова: небезпечні явища; відкладення ожеледі; коефіцієнт кореляції; дискримінантний аналіз; побудова лінійної дискримінантної функції; прогноз; оцінка справджуваності.

Вступ. Як відомо відкладення ожеледі відносяться до несприятливих погодних явищ. На території України відкладення ожеледі є типовим явищем та спостерігаються кожного року у зимові місяці та окремі місяці перехідних сезонів (наприкінці осені та до середини весни). Найбільш небезпечними вони є для діяльності ряду галузей господарства. У першу чергу вони перешкоджають безперебійній роботі таких ланок економіки як електроенергетика, зв'язок, транспорт, комунальна сфера. Також такі відкладення можуть впливати на сільськогосподарську сферу сприяючи утворенню льодяної кірки на посівах та руйнуючи сади ламаючи фруктові дерева. Найбільш небезпечними при цьому є значні відкладення ожеледі категорії НЯ (небезпечні) та СГЯ (стихийні). Крім того збитків можуть завдати масові відкладення ожеледі, які охоплюють значні площі, особливо якщо вони поєднуються із значними, або якщо значні відкладення ожеледі набувають масового характеру. Зважаючи на руйнівну силу таких відкладень актуальним є не тільки постійний моніторинг розповсюдження таких відкладень, визначення динаміки їх прояву на окремих територіях, а й можливість передбачення їх утворення.

ISSN:2306-5680 **Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolojiia. 2020. № 1 (56)**