

УДК 551.501.8:551.576

Заболоцька Т. М., Кривобок О. А., Шпиг В. М.
Український гідрометеорологічний інститут
ДСНС України та НАН України

ВОДОРЕСУРСИ ФРОНТАЛЬНИХ ХМАРНИХ СИСТЕМ У ХОЛОДНИЙ ПЕРІОД РОКУ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Ключові слова: фронтальні хмарні системи, фазовий стан опадів, водоресурс, водозапас, опадогенеруюча здатність, відновлення водозапасу

Вступ. Дані про водоресурси фронтальних хмарних систем, особливо тих, що супроводжуються сильними опадами, мають велике практичне значення. Без них неможливо оцінити послаблення електромагнітних хвиль, розрахувати ймовірне обведення літаків, оцінити необхідність штучного збільшення опадів чи розсіювання хмар над аеропортами, астрономічними обсерваторіями тощо. Такі дані можна отримати за літаковим зондуванням хмар, проте при цьому відповідні виміри вологовмісту неможливо виконати у всьому просторі фронтальної системи та повністю за весь час її існування [2, 3]. Тому особливу цінність мають дані, що отримують з геостаціонарних [6] і полярно-орбітальних супутників [1], коли виміри макрофізичних (кількість хмар, верхня межа, оптична товщина) та мікрофізичних (фазовий стан, водозапас, розмір хмарних частинок) безперервні в часі та охоплюють весь масив фронтальної хмарності.

Мета дослідження – визначити водозапаси, водоресурси та втрати вологовмісту під час випадіння опадів різних градацій (особливо сильних) при проходженні фронтальних хмарних систем у холодний період року.

Методика дослідження. Дослідження водозапасів та водоресурсів фронтальних хмарних систем холодного періоду року виконані на прикладі трьох синоптичних ситуацій, що зумовлювали сильні опади на території України, а саме: 8-13 січня, 30 січня – 6 лютого та 27-31 березня 2015 р.

Вихідними даними були щогодинні супутникові виміри водозапасу (P) хмарних ділянок (пікселів) на всій території України з деталізацією у просторі 10x10 км за допомогою каналів у видимому спектрі супутника MSG [5] та інформація про тривалість (T) та кількість (Q) опадів на 40 станціях наземної гідрометеорологічної мережі, більш-менш рівномірно розміщених по території, а також швидкість переносу хмар (V) за даними аерологічних зондувань. Зважаючи на те, що

виміри кількості опадів виконують 4 рази на добу (00, 06, 12, 18), а опади можуть мати різну тривалість, то в базу даних для подальших розрахунків внесені ті випадки, коли точно визначена тривалість та відповідна їй кількість опадів. Тобто, максимальну тривалість опадів більше 6 год фіксували тільки в тих випадках, коли вони продовжувалися < 1 год в наступному 6-годинному інтервалі, а їх кількість можна було точно зафіксувати. Обчислення опадогенеруючої здатності K (як відношення кількості опадів до водозапасу), коефіцієнту опадогенеруючої здатності K* (значення K, приведене до 1 год), водоресурсу Q*(Q*=3,6 10⁻³×P×V×T) та відновлення водозапасу (витрати водоресурсу) під час випадіння опадів (Q/Q*) проводилися згідно [2].

Загальна характеристика опадів.

Фазовий стан опадів. Впродовж 8-13 січня опади були як кристалічні, так і крапельні, проте перевагу мали опади у вигляді снігу, мокрого снігу або зливого мокрого снігу (65%, тобто дві третини всіх випадків). В іншій третині випадків вони були крапельними, майже однаково у вигляді дощу (19%) та зливи (16%).

30 січня – 6 лютого фазовий стан опадів розподілявся таким чином: кристалічні – 46% та крапельні – 54% опади. В обох випадках переважали опади зливого характеру (зливовий мокрий сніг та зливовий дощ).

27 – 31 березня частіше були крапельні опади (з однаковою ймовірністю дощу чи зливи), проте в кожному п'ятому випадку (19%) опади були кристалічними (переважно зливовий мокрий сніг).

Тривалість опадів під час вимірів водозапасу. Наведені в табл. 1 дані щодо тривалості опадів у проміжки часу з вимірами водозапасу свідчать про певні спільні риси розподілу, не зважаючи на різний температурний режим та фазовий стан опадів (табл. 1).

1. Незначна повторюваність нетривалих (< 1год) опадів, в межах 10%.

Таблиця 1 – Повторюваність (%) тривалості опадів

Синоптична ситуація	Т, год				Кількість вимірів
	≤ 1	1,1-3	3,1-5	>5	
08-13.01	11	44	34	11	260
30.01-06.02	10	36	30	24	368
27-31.03	10	30	26	36	338

2. Зменшується повторюваність опадів тривалістю 1,1-3 чи 3,1-5 год за збільшенням частоти крапельних опадів, в той час як повторюваність тривалих опадів (> 5 год) зростає, що видно з послідовного переходу від однієї до іншої синоптичної ситуації (відповідно 11, 24, 36 %).

Кількість опадів. Розподіл кількості опадів у всіх синоптичних ситуаціях подібний, а саме: зі збільшенням кількості опадів поступово зменшується їх повторюваність, табл. 2.

Таблиця 2 – Повторюваність (%) кількості опадів

Синоптична ситуація	Q, мм					Кількість вимірів
	≤ 1	1,1-3,0	3,1-5,0	5,1-10,0	>10	
08-13.01	45	41	10	3	1	260
30.01-06.02	47	26	14	9	4	368
27-31.03	40	33	13	11	3	338

Максимальну повторюваність мають опади кількістю ≤1 мм (40-47%). Відмінності полягають в тому, що в першій синоптичній ситуації, в якій переважали кристалічні опади, 90-процентиль складає 3 мм, в інших двох, в яких збільшена частота крапельних опадів, відповідно 5 мм. Також помітно (втричі) збільшується повторюваність сильних опадів (>5 мм), відповідно від 4 до 13-14%. Максимальна кількість опадів за

окремий випадок зафіксована у 1-й синоптичній ситуації як 20,6 мм за 6 год, у 2-й – 9,5 мм за 2 год 20 хв або 17,5 мм за 6 год, у 3-й – 14,3 мм за 5 год 20 хв.

Інтенсивність опадів. Згідно Настанови [4], за інтенсивністю опади були визначені як слабкі (<0,17), помірні (0,17-0,50), сильні (0,51-1,58) та дуже сильні (>1,58 мм/год) (табл. 3).

Таблиця 3 – Повторюваність (%) інтенсивності опадів

Синоптична ситуація	I, мм/год				Кількість вимірів
	<0,17	0,17-0,50	0,51-1,58	>1,58	
08-13.01	14	40	42	4	260
30.01-06.02	16	38	36	10	368
27-31.03	9	42	38	11	338

Усім трьом синоптичним ситуаціям в більшій мірі властиві помірні та сильні опади (в середньому 40 та 38 %). Слабкі та дуже сильні опади мають у 3-4 рази меншу повторюваність. Відмінності між ситуаціями полягають у суттєвому збільшенні (майже в 3 рази) повторюваності дуже сильних опадів (4 проти 10-11%) та в меншій частоті слабких (14-16% проти 9), коли частіше фіксують крапельні опади. Максимальна інтенсивність була у 1-й синоптичній ситуації – 4,65 мм/год, у 2-й – 4,08 мм/год, у 3-й – 3,25 мм/год.

Водозапаси та водоресурси фронтальних хмарних систем. Аналіз водозапасів фронтальних хмарних систем, їх опадогенеруючої здатності та водоресурсів було виконано відносно інтенсивності опадів як найбільш показового параметра за даними вищенаведеної характеристики опадів (табл. 4).

Таблиця 4 – Розподіл водозапасу (%) залежно від інтенсивності опадів

P, г/м ²	I, мм/год			
	<0,17	0,17-0,50	0,51-1,58	>1,58
08-13.01.2015				
17	8	8		
35	5	27	26	
70		4	17	4
150				1
30.01-06.02.2015				
17	8	3		
35	6	29	3	
70		8	26	
150			6	11
27-31.03.2015				
17	11	3		
35	1	34	1	
70		6	25	
150			12	7

Слабким опадам більше властивий водо-запас у 17 г/м^2 , в середньому вдвічі рідше фіксували 35 г/м^2 . У помірних опадах водо-запас відмічали в межах $17-70 \text{ г/м}^2$, але най-частіше 35 г/м^2 (27-34%). Такий розподіл практично характерний всім трьом синоптич-ним ситуаціям, хоча можна відмітити, що опади з перевагою кристалічної фази мають більшу повторюваність водозапасу у 17 г/м^2 (8 % проти 3%).

Більш помітні відмінності в значеннях водозапасу мали місце під час випадіння сильних та дуже сильних опадів. У першій синоптичній ситуації сильним опадам був властивий водозапас 35 г/м^2 (26%), меншою мірою 70 г/м^2 (17%), у другій та третій – 70 та 150 г/м^2 . Дуже сильним опадам більш власти-вий водозапас у 150 г/м^2 . Загалом такий водозапас фіксували у сильних та дуже сильних опадах у всіх трьох синоптичних ситуаціях, проте з різною частотою, яка зростала зі збільшенням опадів з крапельною фазою, відповідно 1, 17, 19%.

Залежність опадогенеруючої здатності (K) від кількості опадів представлена на рис. 1 а,

б, в (відповідно для всіх трьох синоптичних ситуацій). Вони побудовані для помірних та сильних опадів ($Q > 3 \text{ мм}$).

Обидва розподіли свідчать про майже пряму залежність K від Q. Перший розподіл формують опади як крапельної (дощ), так і кристалічної фази (сніг, мокрий сніг), другий – переважно зливові дощі.

Значення вологовмісту залежить від швидкості зміщення хмар, що ілюструє табл. 5, де представлена залежність коефіцієнта опадогенеруючої здатності (K^*) від швидкості переносу хмар.

Таблиця 5 – Повторюваність значень (%) коефіцієнта опадогенеруючої здатності (K^*) залежно від швидкості вітру на рівні зміщення хмар для помірних та сильних опадів 27-31.03.2015 р.

Швидкість вітру, м/с	Коефіцієнт опадогенеруючої здатності		
	≤ 10	10,1-15	15,1-20
<5	69	19	12
5,1-10	48	44	8
>10	59	38	3

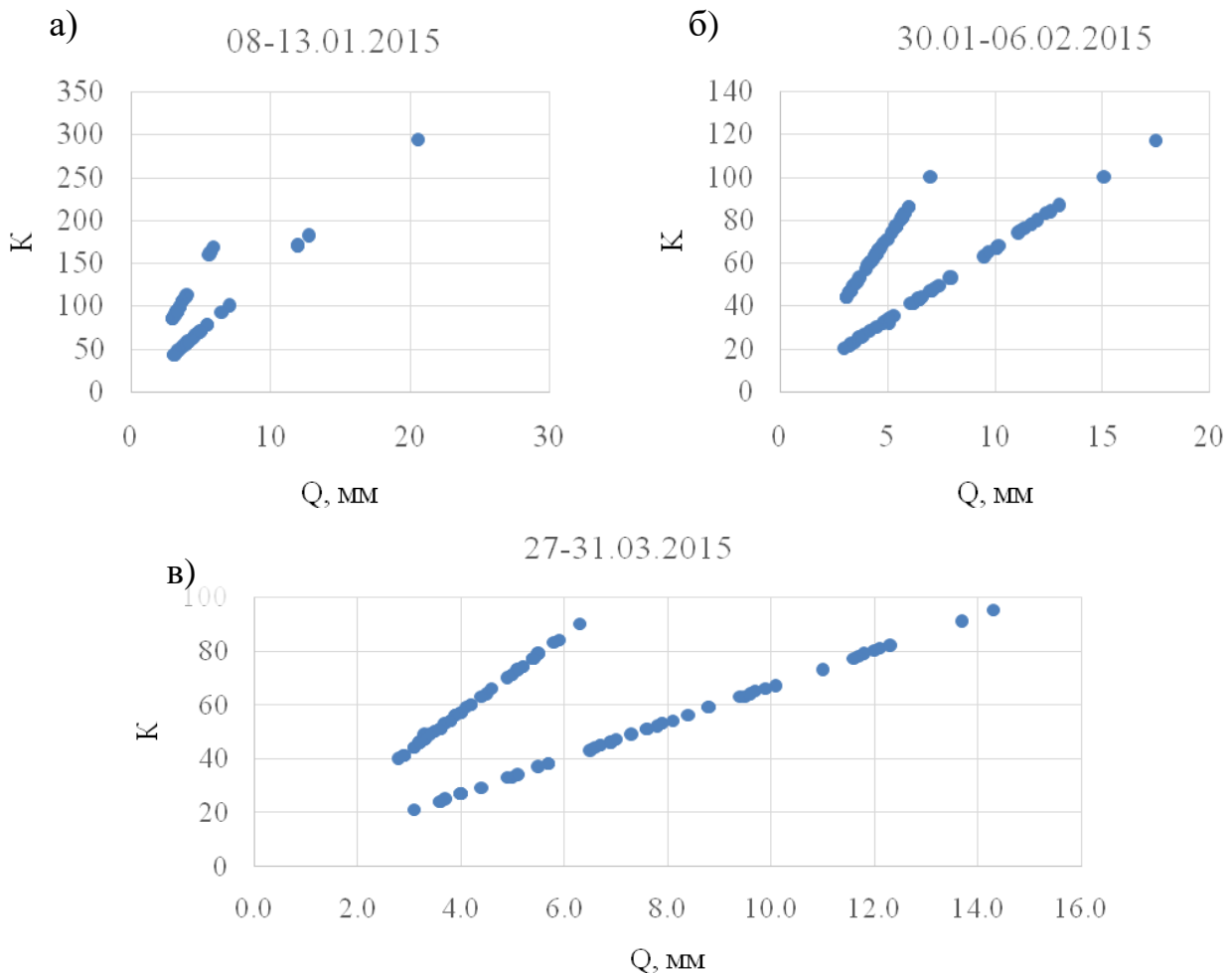


Рис. 1 – Залежність опадогенеруючої здатності (K) від кількості опадів (Q)

На великі значення (понад 15) K^* припадає усього лише від 3 до 12 відсотків. Найбільша повторюваність K^* має місце для градації ≤ 10 . Залежність коефіцієнта від швидкості вітру проявляється в тому, що зі збільшенням швидкості вітру зменшується повторюваність максимальних значень K^* (>15), відповідно 12, 8, 3 %.

При обчисленні водоресурсів (Q^*) хмар, з яких випадають опади, враховуються водозапас, тривалість опадів та швидкість переносу. Відповідний розподіл Q^* представлено в табл. 6.

Для всіх трьох синоптичних ситуацій при проходженні хмарної системи над пунктом

спостереження максимальну повторюваність має водоресурс у ≤ 5 т (51, 48, 47%), а в межах до 10 т практично більша частина хмар (80, 68, 67 %). Відмінність між синоптичними ситуаціями полягає в тому, що для першої ситуації, в якій переважали опади кристалічної фази, діапазон водоресурсів становить $\leq 5, \dots, 25$ т, а для інших двох значно ширше $\leq 5, \dots, 80$ т.

Як приклад, наведемо залежність водоресурсів від тривалості опадів у двох синоптичних ситуаціях, які різняться фазовим станом опадів: 08-13.01.2015 та 27-31.03.2015 (табл. 7, 8).

Таблиця 6 – Повторюваність (%) водоресурсів у фронтальних хмарних системах

Водоресурс, т									
≤ 5	5,1-10	10,1-15	15,1-20	20,1-25	25,1-30	30,1-40	40,1-50	50,1-60	60,1-80
08-13.01.2015									
51	29	12	4	4	–	–	–	–	–
30.01-06.02.2015									
48	20	11	8	3	3	3	1	2	1
27-31.03.2015									
47	20	13	5	7	1	3	2	1	1

Таблиця 7 – Залежність (%) водоресурсу (Q^*) від тривалості (Т) опадів 08-13.01.2015 р.

Т, год	Q^* , т					
	≤ 5	5,1-10	10,1-15	15,1-20	20,1-25	>25
≤ 1	11					
1,1-3,0	31	10	1		1	
3,1-5,0	9	15	6	3	1	
$>5,0$	1	3	4	1	2	1

Таблиця 8 – Залежність (%) водоресурсу (Q^*) від тривалості (Т) опадів 27-31.03.2015 р.

Т, год	Q^* , т						
	≤ 5	5,1-10	10,1-20	20,1-30	30,1-40	40,1-50	>50
≤ 1	9	1	0,5				
1,1-3,0	20	4	4				
3,1-5,0	11	7	4	3	1		0,5
$>5,0$	6	8	9	6	2	2	2

Риси розподілу в обох синоптичних ситуаціях подібні. У нетривалих опадах водоресурс практично не перевищує 5 т. Зі збільшенням тривалості опадів розширюється діапазон більш високих значень водоресурсів ($>50-60$ т), особливо в хмарах, які зумовлюють опади крапельної фази.

Величина Q/Q^* (%) визначає ту частину вологовмісту фронтальних хмар, що були використані для утворення опадів при

проходженні через пункт спостереження, тобто характеризує процес відновлення водозапасу, табл. 9, рис. 2.

Розподіл значень Q/Q^* практично однаковий для всіх синоптичних ситуацій. Для більшості випадків (75-80 %) при випадінні опадів використовується не більше 0,4 всього водоресурсу. Повне відновлення водозапасу (1,0-1,5) фіксували в 1 % випадків.

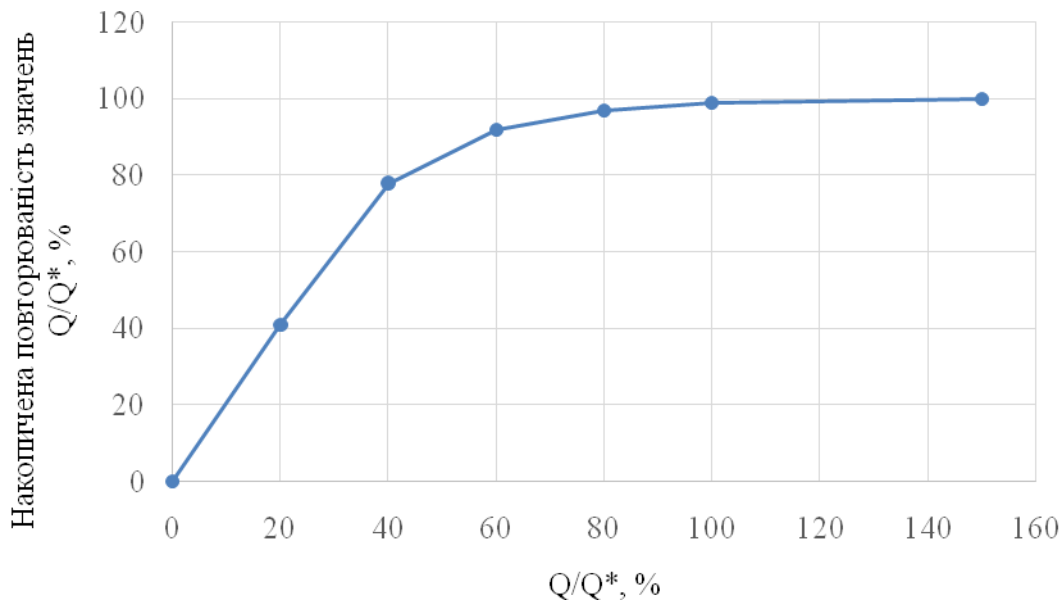


Рис. 2 – Узагальнена для всіх трьох синоптичних ситуацій накопичена повторюваність значень Q/Q^*

Таблиця 9 – Повторюваність відновлення водозапасу (%)

Q/Q* (%)							
≤ 20	21-40	41-60	61-80	81-100	101-120	121-140	141-160
08-13.01.2015							
41	39	12	5	2	0,4	0,3	0,3
30.01-06.02.2015							
44	37	12	5	1	0,3	0,7	–
27-31.03.2015							
39	36	18	4	2	0,5	0,5	–

Висновки.

1. Визначено характерні значення водозапасу хмар, що зумовлюють опади різної інтенсивності (слабкі, помірні, сильні та дуже сильні) у холодний період року.

2. Залежність опадогенеруючої здатності хмар від кількості опадів проявляється у вигляді двох прямолінійних залежностей для кожної синоптичної ситуації, що ймовірно зумовлено особливостями формування водозапасу хмар.

3. Визначено розподіл водоресурсів хмар для всіх трьох ситуацій. Максимальну повторюваність має водоресурс у ≤ 5 т (51, 48, 47%, тут і надалі відповідно для кожної із досліджуваних ситуацій), а в межах до 10 т

практично більша частина хмар (80, 68, 67%). Якщо була перевага опадів кристалічної фази, то максимальне значення водоресурсів не перевищувало 25 т, а для крапельної – 80 т.

4. Для більшості випадків (75-80%) при випадінні опадів використовується не більше 0,4 всього водоресурсу. Повне відновлення водозапасу (1,0-1,5) фіксували в 1 % випадків.

5. Для уточнення та практичного використання розподілу водоресурсів у фронтальних хмарних системах у холодний період року, що супроводжуються опадами, необхідні спеціальні дослідження з вимірами кількості опадів щогодини.

Список літератури

1. Волкова Е. В. Детектирование облачности и определение ее параметров по спутниковым данным в светлое время суток / Волкова Е.В., Успенский А.Б. // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 12. – С. 5-20.
2. Заболоцкая Т. Н. Водозапасы облаков различных форм и фронтальных облачных систем / Заболоцкая Т. Н., Кушнир В. С., Шпиталь Т. Н. // Труды УкрНИГМИ. – 1992. – Вып. 243. – С. 69-78.
3. Мамина Е. Ф. О водном балансе облачной системы / Мамина Е. Ф., Федоров Е. К. // Изв. АН СССР. – 1957. – № 5 : Сер. геофиз. – С. 658-663.
4. Наставление по службе прогнозов. Раздел 2. – Л. : Гидрометеиздат, 1981. – 56 с.
5. Kryvobok O. A. Monitoring characteristics of young convective clouds using MSG data / Kryvobok O. A. // Meteo-France, Toulouse. Visiting Scientist Report. – 30 January 2005. –

P. 49. 6. Schmid J. The SEVIRI instrument / Schmid J. // Proc. of the 2000 Eumetsat Meteor. Sat. Data User's Conf. (Italy, 29 May – 2 June 2000). – Eum P 29, 2000. – P. 23-32.

Заболоцька Т.М., Кривобок О.А., Шпиг В.М. Водоресурси фронтальних хмарних систем у холодний період року за даними супутникових спостережень. На прикладі трьох синоптичних ситуацій виконано розрахунки водоресурсу, опадогенеруючої здатності та відновлення водозапасу у фронтальних хмарних системах, що супроводжувалися сильними опадами. Використано дані супутникових спостережень, мережі метеорологічних станцій та аерологічного зондування атмосфери. Отримано характерні значення водозапасу, водоресурсу, опадогенеруючої здатності залежно від інтенсивності опадів та їх фазового стану. Показано, що у більшості випадків під час випадіння опадів над станцією використовується до 0,4 водоресурсів хмар. Повне відновлення водозапасу (1,0-1,5) фіксували в 1% випадків.

Ключові слова: фронтальні хмарні системи, фазовий стан опадів, водоресурс, водозапас, опадогенеруюча здатність, відновлення водозапасу.

Zabolotska T.M., Kryvobok O.A., Shpyg V.M. Water balance of frontal cloud systems in cold period estimated by satellite measurements. Information of water content of frontal clouds produced strong precipitation has important practical applications. Such type of data is necessary for the estimation of electromagnetic waves attenuation, the calculation of aircrafts' icing possibility, the estimation of necessity of an increase of precipitation or clouds dissipation (for the cases when thick cloudiness is observed over airports and astronomical observatories) by using of weather modification technologies and so on. This information can be obtained by aircrafts' sounding, but not for the whole area of cloud frontal system and not for the all-time of their existence. Nowadays the satellites can provide measurements of cloud systems parameters continuously and on a large scale. The main objective of this research is to define the water content, water balance and liquid water losses for different precipitation intensity levels (especially heavy) of frontal cloud systems in cold period. The analysis of water contents and water balances for the three synoptic situations: 08-13 January, 30 January – 06 February, 27-31 March 2015 have been done. Initial data included: the hourly water content estimated by satellite measurements (P), the precipitation amount (Q) and duration (T) observed on 40 meteorological stations and the wind speed on the cloud level (V) derived from air soundings. Other characteristics as precipitation generation ability (K), the water balance ($Q^*=0.36 \times P \times V \times T$) and water balance recovery (Q/Q^*) were defined. Some specific values of the typical water content for different precipitation intensity levels were defined. The dependence K on Q is manifested in the form of two straight-line dependencies for each synoptic situation, which is probably due to the peculiarities of the formation of the water content of clouds. For clouds with crystal precipitation the maximal value of water balance was 25 tons and for clouds with liquid water precipitation – 80 tons. The data of water balance recovery during process of precipitation are interesting. For this purpose, the amount of water transported by the clouds over the meteorological stations was calculated during the time of precipitation. The ratio of Q to the value of Q^* characterizes the process of water balance recovery. It was shown, that the distribution of Q/Q^* was the same for all synoptic situations. For most cases (75-80%) water loses due to precipitation were no more than 0.4 Q^* . The all water balance recovery (Q/Q^* equals 1.0...1.5) was in 1 % cases.

Keywords: frontal cloud systems, phase state of precipitation, water source, water content, precipitation generation ability, water balance recovery.

Заболоцкая Т.Н., Кривобок А.А., Шпиг В.М. Водоресурсы фронтальных облачных систем в холодный период года по данным спутниковых наблюдений. На примере трёх синоптических ситуаций выполнены расчеты водоресурса, осадкогенерирующей способности и восстановления водозапаса во фронтальных облачных системах, которые сопровождались сильными осадками. Используются данные спутниковых наблюдений, сети метеорологических станций и аерологического зондирования атмосферы. Получены характерные значения водозапаса, водоресурса, осадкогенерирующей способности в зависимости от интенсивности осадков и их фазового состояния. Показано, что в большинстве случаев во время выпадения осадков над станцией используется до 0,4 водоресурсов облаков. Полное восстановление водозапаса (1,0-1,5) фиксировали в 1 % случаев.

Ключевые слова: фронтальные облачные системы, фазовое состояние осадков, водоресурс, водозапас, осадкогенерирующая способность, восстановление водозапаса.

Надійшла до редколегії 28.03.2018