УДК 551.576
Ромаш Т. А., Шпиг В. М.
Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ ЗАПАСУ ВОЛОГИ В АТМОСФЕРІ В ПЕРІОД СИЛЬНИХ СНІГОПАДІВ

Досліджуються особливості розподілу вологи на основі даних аерологічного зондування атмосфери під час проходження снігопадів над територією України. Здійснено оцінку точності даних об'єктивного аналізу на стандартних ізобаричних поверхнях та прогностичних вертикальних профілях.
Ключові слова: водяна пара, атмосфера, вологозапас, снігопад.

Вступ. Атмосферна волога, її фазові переходи та вологообмін відіграють важливу роль у формуванні клімату та водного режиму суходолу. Вміст водяної пари є однією з основних характеристик атмосфери. Наявність водяної пари в атмосфері має значний вплив на теплові умови атмосфери та земної поверхні. Водяна пара сильно поглинає довгохвильову радіацію, яку випромінює земна поверхня. У свою чергу і сама вона випромінює подібну радіацію, більша частина якої іде до земної поверхні. Це зменшує нічне охолодження земної поверхні та нижніх шарів повітря [1, 2, 9].

Водяна пара відіграє важливу роль у процесах опадоутворення. Як відомо, джерелом її надходження в атмосферу є поверхня Землі, тому майже половина водяної пари зосереджена в нижньому шарі. Зменшення вологості з висотою залежить від вертикального розподілу температури та умов перемішування повітря [10]. У даному дослідженні ставилося за мету виявити особливості розподілу вологи на основі даних аерологічного зондування атмосфери під час проходження снігопадів над територією України та провести оцінку точності даних об'єктивного аналізу на стандартних ізобаричних поверхнях та прогностичних вертикальних профілів для відношення суміші і вологозапасів атмосфери, отриманих за допомогою мезомасштабної атмосферної моделі WRF ARW v. 2.2.1.

© Т. А. Ромаш, В. М. Шпиг

Методика дослідження. Дослідження включало чотири основних етапи:

- визначення особливостей вертикального розподілу вологи під час сильних снігопадів за фактичними даними радіозондувань;
- відтворення термодинамічних умов розвитку хмарності;
- оцінка помилок об'єктивного аналізу та прогнозу вертикальних профілів вологи за даними моделі WRF ARW v. 2.2.1 та фактичних радіозондувань (м.Київ);
- оцінка точності прогнозів запасів вологи у стовпі атмосфери моделі WRF ARW v. 2.2.1. по м. Київ.

Вертикальні профілі запасів вологи відтворювалися за даними аерологічних зондувань на території України, котрі були отримані з університету штату Вайомінг (Wyoming), США. Самі запаси вологи в об'ємі повітря виражалися через абсолютну вологу, котра розраховувалась за формулою:

$$a = \frac{0{,}8e}{1 + \alpha t},$$

де e – пружність водяної пари, гПа, α – коефіцієнт об'ємного розширення газу (0,003667), t – температура повітря.

Вологозапас у стовпі повітря розраховувався як інтеграл значень a по висоті на одиницю площі.

Тривимірна діагностична модель, розроблена в УкрНДГМІ [3, 5], була застосована для моделювання метеорологічних величин в момент формування опадів. В якості початкових слугують дані мережі станцій аерологічного радіозондування України та сусідніх держав, отримані з Британського центру атмосферних даних (The British Atmospheric Data Centre). У процесі моделювання була використана розрахункова сітка з кроками dx і dy, що дорівнювали відповідно 25 і 20 км, кроком по вертикалі dz – 200 м та початком відліку в м.Київ з географічними координатами 50° 26' пн.ш і 30° 31' сх.д. Сітка обмежена такими координатами $-925 \geq x \geq 925$ км, $-880 \geq y \geq 840$ км, $0 > z > 15$ км, що охоплює всю територію України та частково сусідні держави. Поля метеорологічних величин розраховуються в Декартовій системі координат (x, y, z), а для врахування рельєфу місцевості застосовується Z-сигма система координат [4].

Для оцінки точності об'єктивного аналізу та прогнозу використовувались наступні характеристики:

$$ME = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(F_i - O_i\right),$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|F_i - O_i\right|,$$

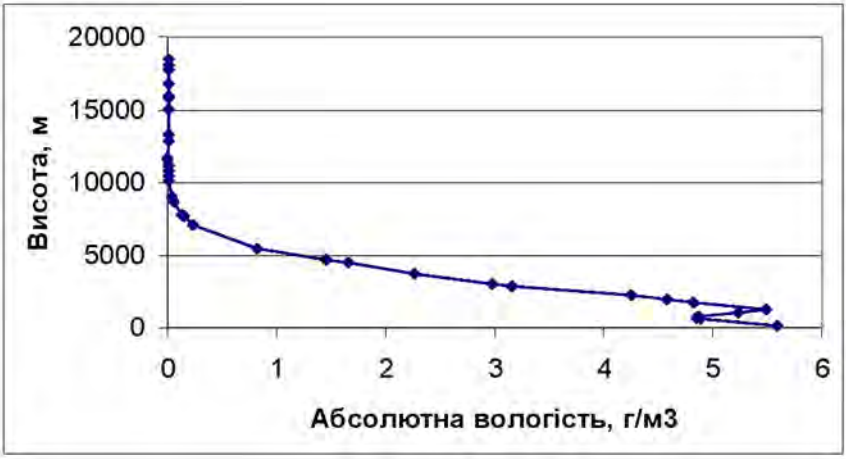
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(F_i - O_i\right)^2},$$

де ME – середня помилка прогнозу метеорологічної величини (абсолютної вологості і т.п.); MAE – середня абсолютна помилка прогнозу метеорологічної величини; $RMSE$ – середньоквадратична помилка метеорологічної величини; N – кількість випадків; F_i – прогнозоване значення; O_i – фактичне значення. Вхідними даними для WRF ARW v. 2.2.1 слугували прогностичні поля моделі GFS (Global Forecast System) [11] для строку ініціалізації моделі 00 UTC протягом березня 2013 р.

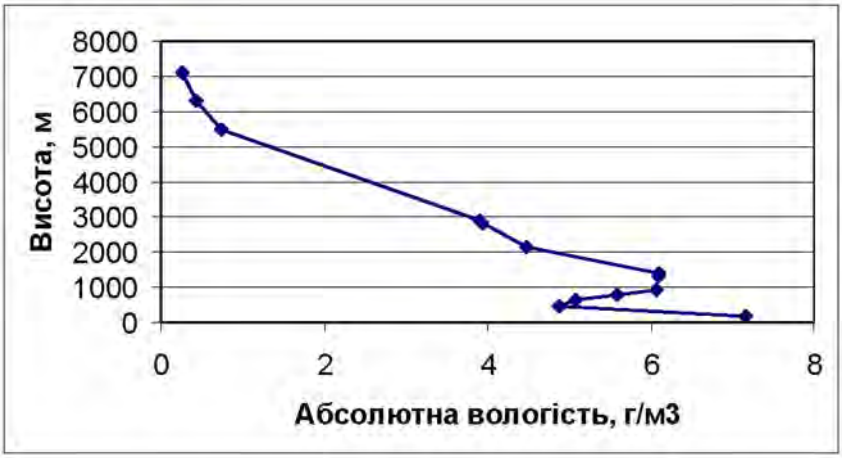
Аналіз отриманих результатів. Розподіл вологи за висотою до 20 км було розглянуто для випадків сильних снігопадів з 2009 по 2013 рік. Аналіз розрахунків показав, що найбільші її запаси припадали на діапазон висот 0,4-1,5 км.

У грудні 2009 року, коли на територію Україну поспіль вийшли три південних циклони [8], сильні снігопади спостерігались практично по всій території країни. Термодинамічні умови розвитку хмарності у цих випадках більш детально описані у [6, 7]. На рис. 1 представлена зміна запасів вологи з висотою під час сильного снігопаду 21 грудня 2009р. для станцій зондування Харкова з висотою до 20 км та Сімферополя з висотою до 7 км. Над Харковом помітне зниження кількості вологи на висоті 800 м (з 5,6 г/м^3 на 155м до 4,8 г/м^3 на висоті 800м). Тоді як на висоті 1300 м спостерігається другий максимум вологи (до 5,5 г/м^3). Зі збільшенням висоти кількість вологи поступово зменшується.

Подібна картина у цей час спостерігалась і в Сімферополі , хоча значення були дещо вищими, що пов'язано із розташуванням станції аерологічного зондування поблизу моря. На висоті 180 м абсолютна волога становила 7,2 г/м^3, на рівні 470 м вона знизилась до 4,9 г/м^3.



Харків



Сімферополь

Рис. 1. Зміна вологого запасу з висотою над м.Харків і м. Сімферополь, 21 грудня 00 GMT, 2009

Другий максимум вологи відмічався у шарі 900-1400 м (до 6,1 г/м^3). Вище цього шару вміст вологи також поступово зменшувався.

Для більш детального відображення умов розвитку процесу опадоутворення було обрано випадок сильного снігопаду в Києві 28 грудня 2009 року. На вибір дати випадку вплинули наступні критерії:

1) дані радіозондування через кожні 12 год. (такий строк зондування на території України є тільки для ОГМС м.Київ);

2) наявність даних радіозондування перед СГЯ, під час та після нього.

У період 28-29 грудня з Балканського півострова на північний схід України переміщувався циклон, зумовлюючи сніг, мокрий сніг та дощ (на південному сході, місцями в центральних і північних областях сильні опади, в Чернігівській, місцями Київській, Полтавській області дуже сильний сніг, в горах Криму дуже сильний дощ), у західних, північних та центральних областях налипання мокрого снігу (в окремих районах Житомирщини й Черкащини сильне). У Києві 28 грудня снігопад за даними метеостанції тривав з 12.00 до 00.00 (12 год.). За цей час випало 28 мм снігу.

За допомогою тривимірної діагностичної моделі було відтворено просторовий розподіл над територією України таких метеовеличин як тиск, температура та ін. З рис.2 видно, що область пониженого тиску на момент початку снігопаду в Києві розташовувалась на північному сході (рис. 2a), тоді як майже над всією північчю країни, температура (рис. 2b) була близькою до 0°C. На рис. 2 також показано просторовий розподіл швидкості конденсації та перенасичення відносно льоду, що були проінтегровані по висоті. На півдні та південному заході країни спостерігалися дещо вищі значення швидкості конденсації, ніж на решті території України (рис. 2c). У цей час перенасичення відносно льоду, що являє собою надлишок водяної пари та являється потенціальним джерелом вологи для процесів опадоутворення, мало більші значення над центральною частиною країни (рис. 2d), величина яких вказує на можливість формування сильних опадів.

На основі даних радіозондування було розраховано абсолютну вологість для цих строків над Києвом: «до», «під час» та «після» снігопаду. Виявлено, що найбільші вологозапаси знаходились також у нижньому півторакілометровому шарі (рис. 3a), вище якого значення абсолютної вологості зменшувалось поступово без різких перепадів. Детальніше розглянемо її зміни у приземному шарі. На рис. 3b показано вертикальний профіль від земної поверхні до висоти 2200 м. Він ілюструє, що у період перед сильним снігопадом та на момент його початку найбільші вологозапаси (близько 4,6 г/м^3) мали місце на висоті 400-800 м. На час закінчення снігопаду значення

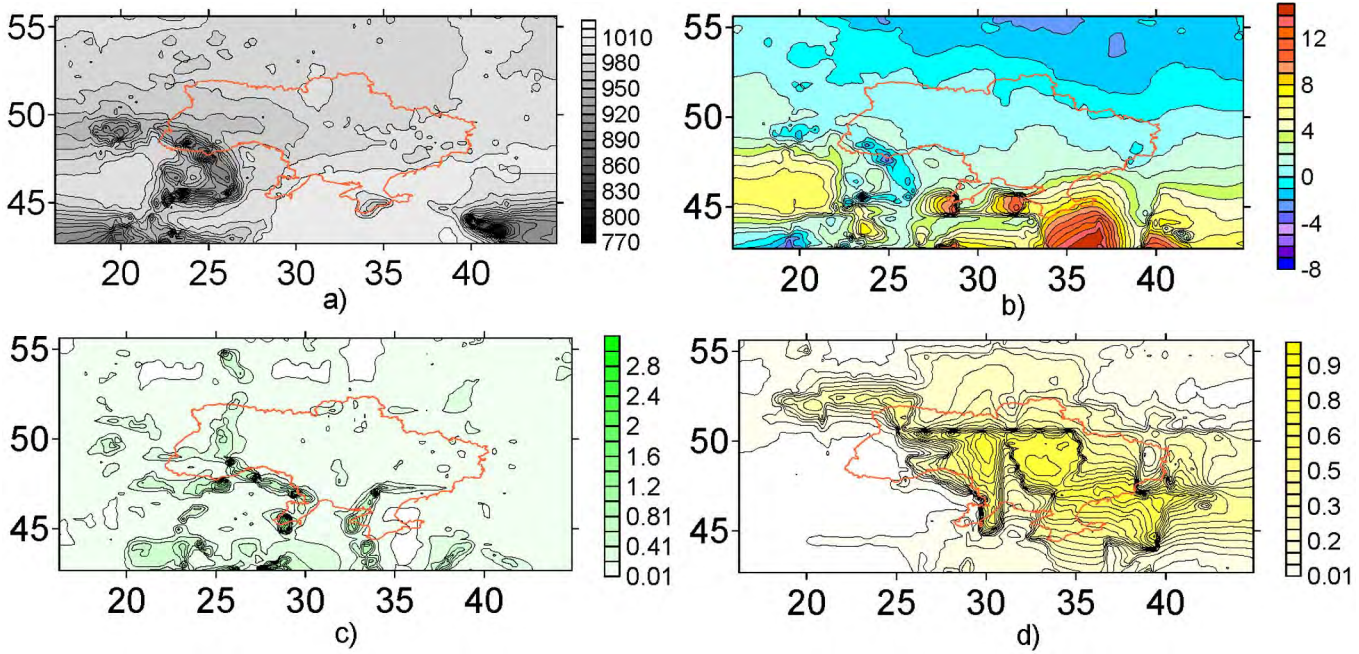
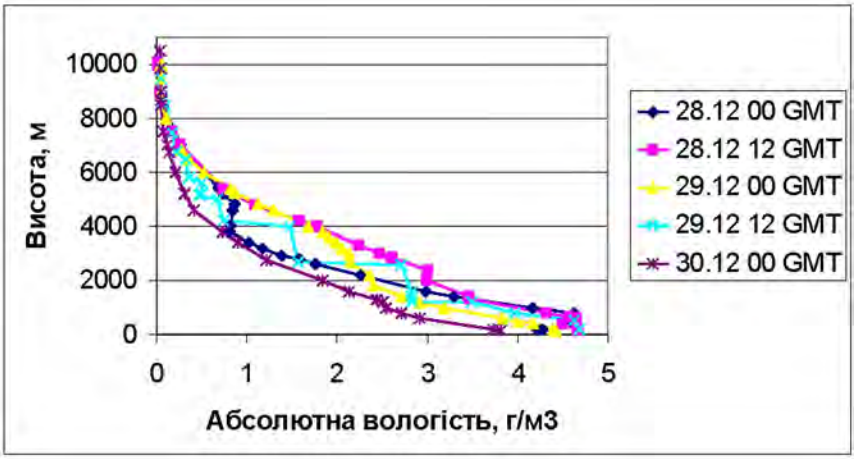
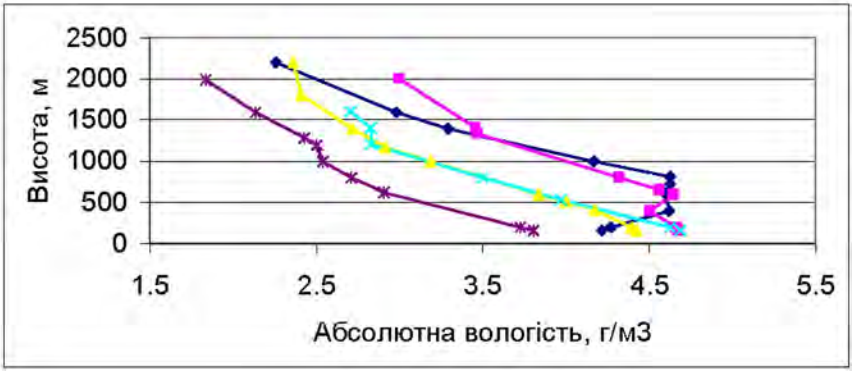


Рис. 2. Просторовий розподіл тиску з урахуванням орографії, гПа, (a); температури повітря, ºС, (b); інтегральної швидкості конденсації, мм/год., (c) та інтегрального перенасичення відносно льоду, мм, (d) над Україною на момент початку сильного снігопаду 28 грудня 2009 р. (12 GMT)



a)



b)

Рис. 3. Залежність абсолютної вологості від висоти в період сильних снігопадів над м.Київ в грудні 2009 р.

абсолютної вологості у даному шарі зменшилися та відмічалося поступове збільшення висоти розташування її максимальних значень.

Оскільки на коливання вологості в атмосфері значно впливає температурний режим, то було розглянуто розподіл вологозапасу (до 10 км) у залежності від температури повітря та висоти для всього інтервалу емпіричних даних й окремо для денних та нічних зондувань. Як видно з рис. 4, найбільші запаси вологи спостерігаються у відносно теплих шарах атмосфери та до висоти близько 1,5 км.

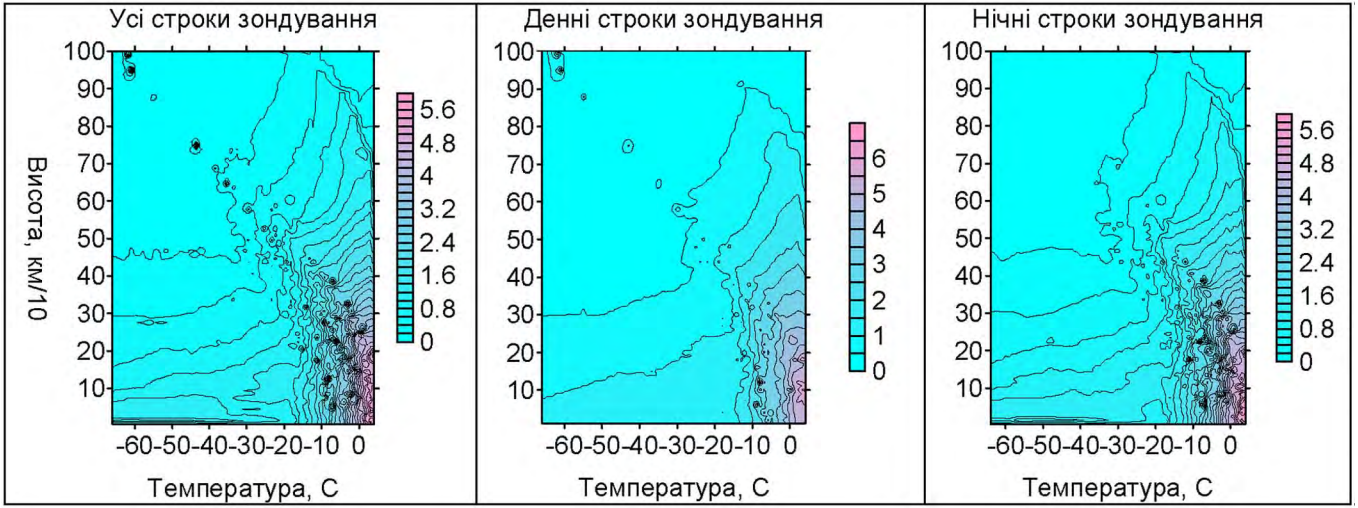


Рис. 4. Розподіл вологозапасу у залежності від температури та висоти над рівнем моря

Розподіл побудовано методом Inverse distance to a power (IDW) interpolation method (інтерполяція по оберненій середньозваженій відстані). Функція IDW має такий вигляд:

$$f(x,y,z,t) = \sum_{i=1}^{N} f_i(t) w_i(x,y,z),$$

$$w_i(x,y,z) = \frac{d_i(x,y,z)^{-p}}{\sum_{j=0}^{N} d_j(x,y,z)^{-p}},$$

$$d_i(x,y,z) = w_z\left|z - z_i\right| + \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2},$$

де *x, y, z* – координати просторового розміщення; *t* – крок по часу; *N* – номер точки; $f_i(t)$ – значення даних у точці для певного моменту часу; $w_i(x, y, z)$ – вагова функція для *i-ї* точки (*x, y, z*); $d_i(x, y, z)$ – функція відстані; *p* – зважений показник степеня; x_i, y_i, z_i – просторові координати точки; w_z – параметр зваженості.

Одним з найбільш сніжних за весь час метеоспостережень у Києві став випадок 22-24 березня 2013 року, причиною якого було проходження активного циклону з Балкан (рис. 5). За 3 доби в місті випало 60 мм снігу, 22 березня – 9 мм, вночі з 22 на 23 березня – 41 мм (рис. 5), решта випала вдень 23 та 24 березня, спричинивши транспортний колапс. Крім Києва та Київської області від сильного снігопаду постраждали західні і північні області країни, де у ці дні випало 30-35 мм і 35-55 мм опадів.

Для вибраного періоду також було побудовано графік зміни абсолютної вологості над м. Київ (рис. 6). Під час снігопаду вночі 22 березня значення вологості були найвищими. Її максимум розташовувався на висоті 800м і становив 4,8 г/м^3. Вдень 22 березня, під час випадіння опадів, піки максимальних значень знаходились на висоті 170 м та 1000 м. Між цими рівнями значення вологості зменшилось, що вказує на можливість послаблення процесів опадоутворення за рахунок відсутності відновлення запасів вологи. Наступне зондування опівночі 23 березня також показало наявність мінімуму значень абсолютної вологості на висоті 600-800м, а самі значення за абсолютною величиною були дещо меншими. У подальшому відмічалося зменшення значень запасів вологи, особливо у шарі 600-1400м, поступове зміщення максимуму від земної поверхні у вище розташовані шари тропосфери. Вдень 24

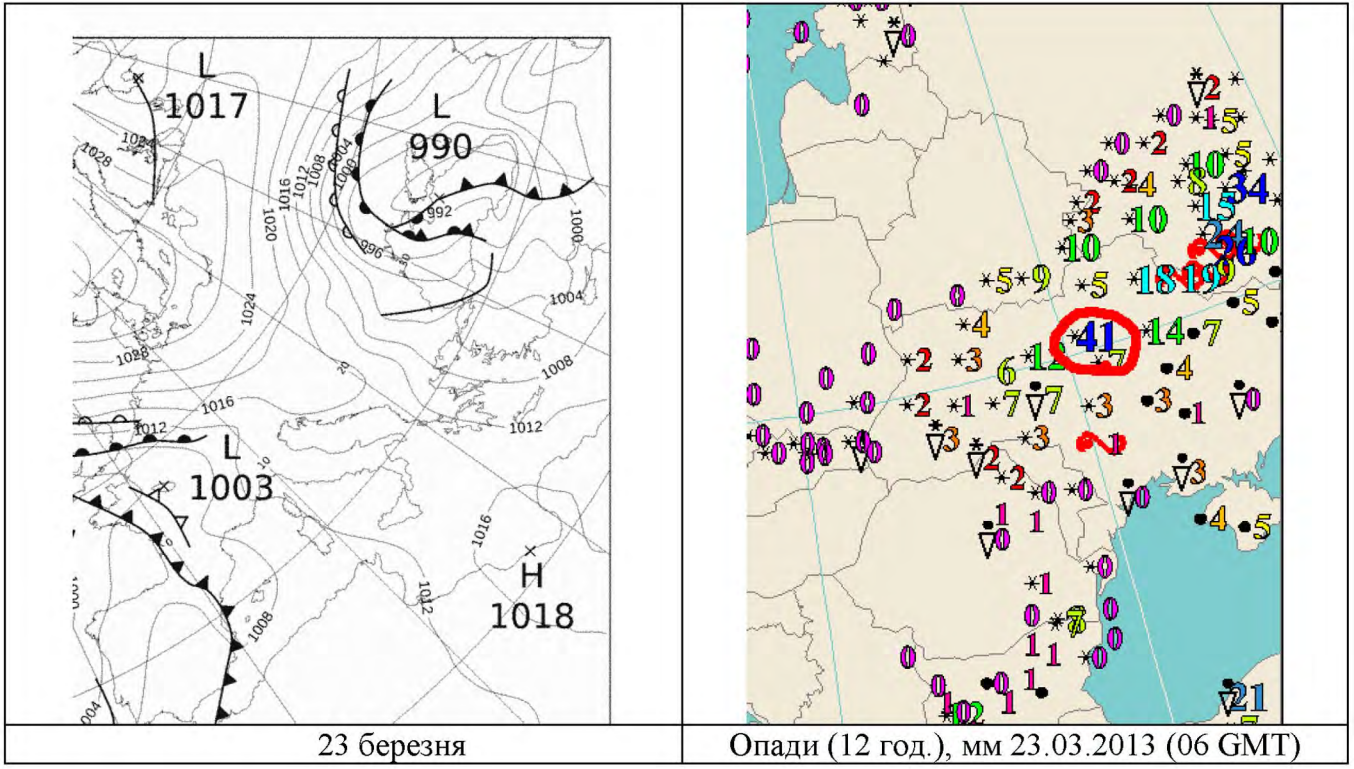


Рис. 5. Синоптична ситуація та накопичена за 12 год. сума опадів 23 березня 2013 р.

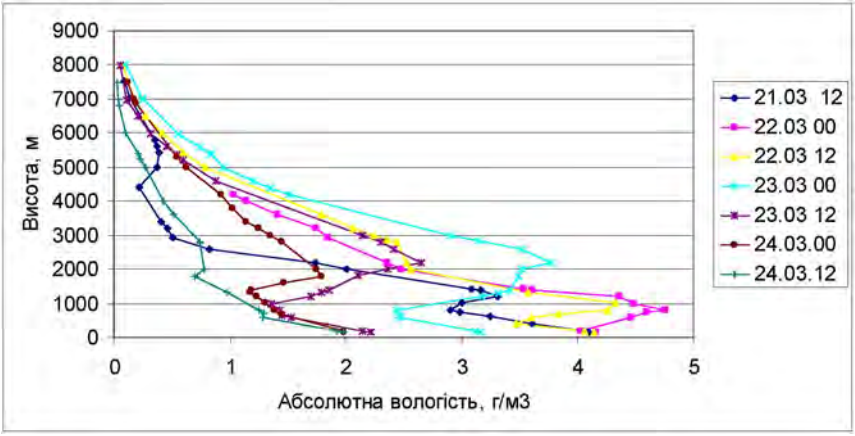


Рис. 6. Зміна вертикального розподілу запасів вологи над Києвом у період 21-23 березня 2013 року

березня, на час закінчення снігопаду, значення абсолютної вологості знижувались з висотою поступово без значних перепадів.

Для того, щоб дати відповідь на питання наскільки добре дані об'єктивного аналізу та прогнозу загального вологозапасу відповідають даним спостережень та з метою визначення подібності між їх взаєморозташуванням, розкидом та асиметрією розглянемо графіки розсіювання та коробчасті діаграми (див. рис. 7, 8), останні відображають діапазон даних, що лежать між 25 та 75 перцентилями (горизонтальна лінія всередині коробки є медіаною, а «вуса» – повний діапазон даних). З рис. 7 видно, що WRF ARW v.2.2.1 досить точно відтворює початкові запаси вологи в атмосфері. Протягом першої і другої доби прогнозу модель тяжіє до завищення. Приблизно однаковий розкид (як в сторону завищення, так і в сторону заниження) спостерігається на третю добу. Для четвертої та п'ятої діб прогнозів характерним є заниження прогнозованих значень по відношенню до фактичних. Як видно з рис. 8 діапазон загальних водозапасів, котрі прогнозувалися, був більшим, ніж ті, що спостерігалися на ОГМС «Київ», за винятком прогнозів четвертої доби. Також підтверджуються вищеописані результати щодо знаку помилок, отримані з використанням графіків розсіювання, щодо завищення прогностичних значень для першої і другої діб. Варто відзначити, що починаючи з третьої доби прогнозу модель поступово тяжіє до заниження значень загального вологозапасу в

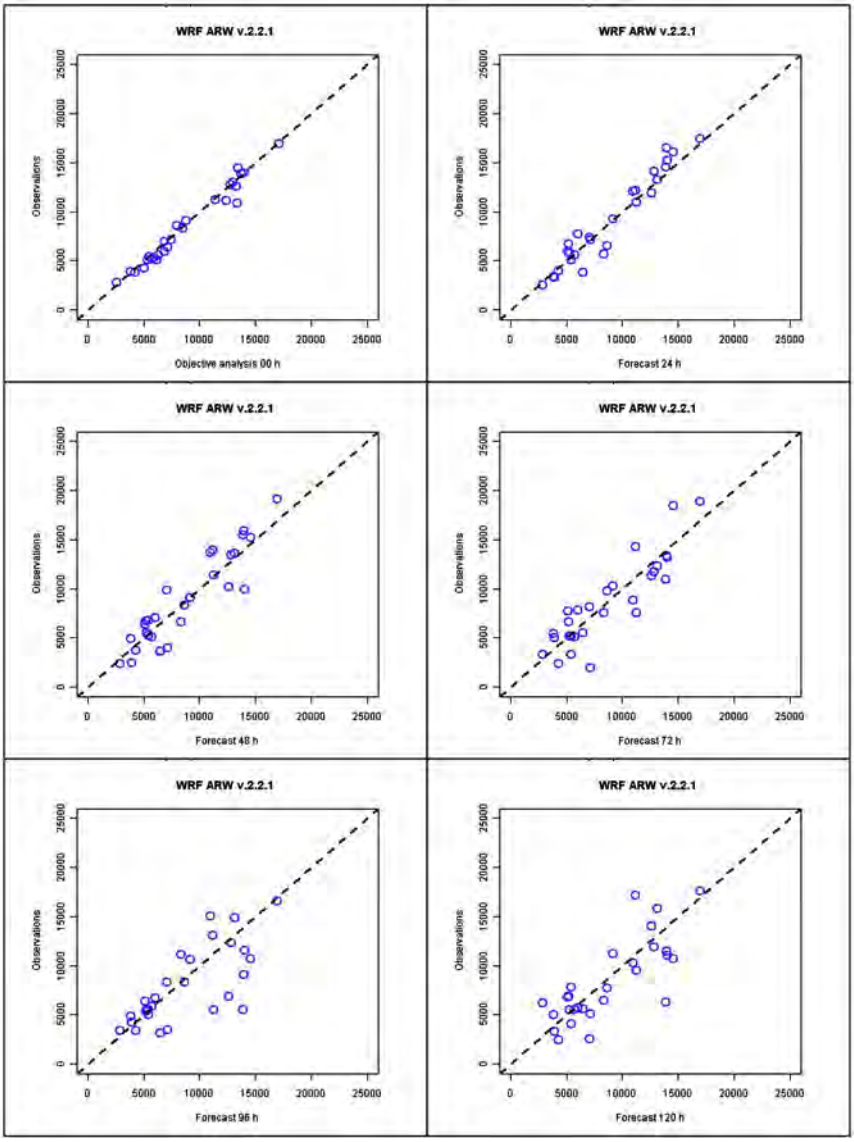


Рис. 7. Графіки розсіювання «прогноз-спостереження» для об'єктивного аналізу (00 h) і прогнозу різної завчасності загального вологозапасу моделі WRF ARW v.2.2.1 (перша, 24 h, – п'ята, 120 h, доба)

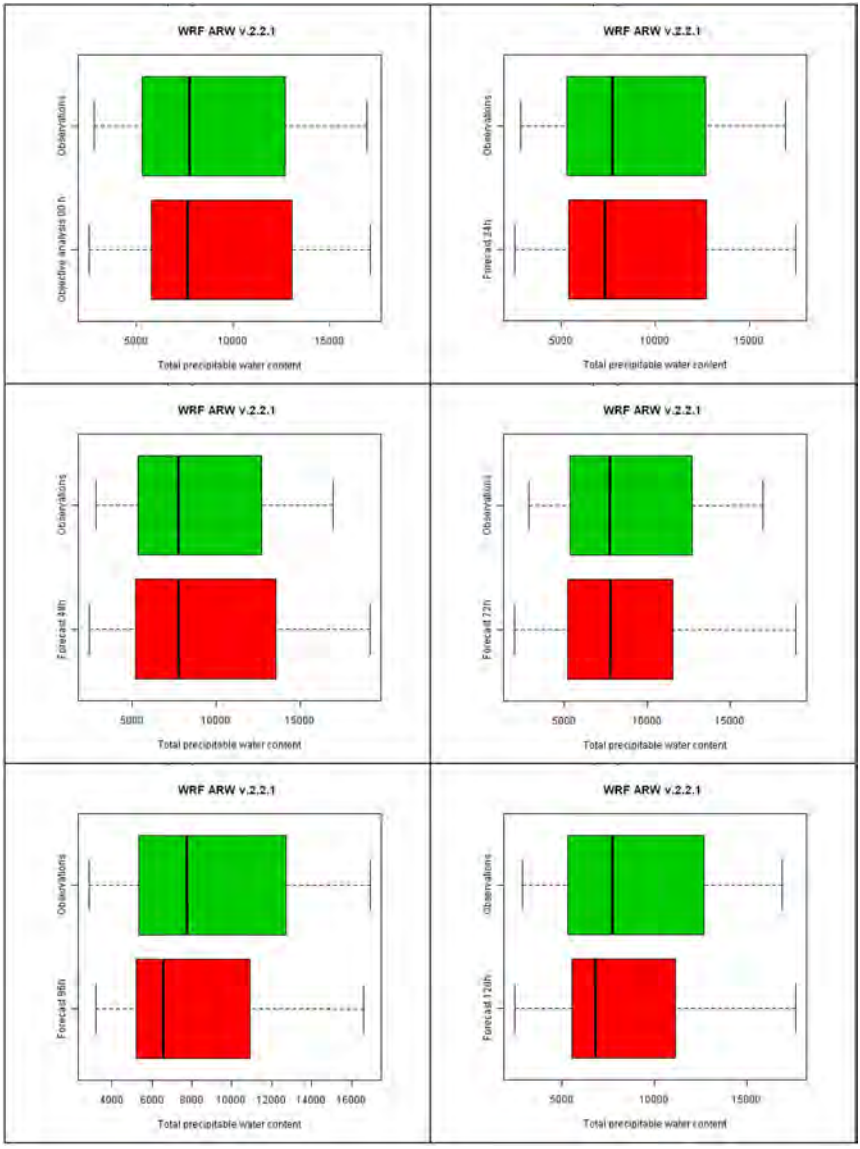


Рис. 8. Коробчасті діаграми для об'єктивного аналізу (00 h) і прогнозу різної завчасності загального вологозапасу моделі WRF ARW v.2.2.1 (перша, 24 h, – п'ята, 120 h, доба)

атмосфері.

Осереднені за березень 2013 р. помилки прогнозів приведено у табл. 1. Величина *ME* підтверджує отримані вище висновки щодо характеру помилок із збільшенням завчасності. Значення *MAE* та *RMSE* вказують на те, що дані моделі WRF ARW v.2.2.1 із завчасністю прогнозу до трьох діб включно, можуть з достатньою точністю використовуватися для практичних потреб, оскільки величина помилок є на порядок меншою фактичних значень запасів вологи, котрі спостерігаються в атмосфері. Найбільші значення помилок прогнозів атмосферної вологи мали місце у нижньому 1,5-кілометровому шарі тропосфери та у середній тропосфері (див. рис. 9).

Таблиця 1

Середня місячна точність об'єктивного аналізу та прогнозів загального вологозапасу атмосфери WRF ARW v.2.2.1 [г/м^2] різної завчасності (м. Київ)

	Об'єктивний аналіз	I доба	II доба	III доба	IV доба	V доба
MAE	495,8	929,7	1448	1656	2089	2064
ME	250,5	200,6	219,3	-95,73	-762,2	-359
RMSE	702,0238	1223,441	1796,102	2039,484	2943,586	2670,968

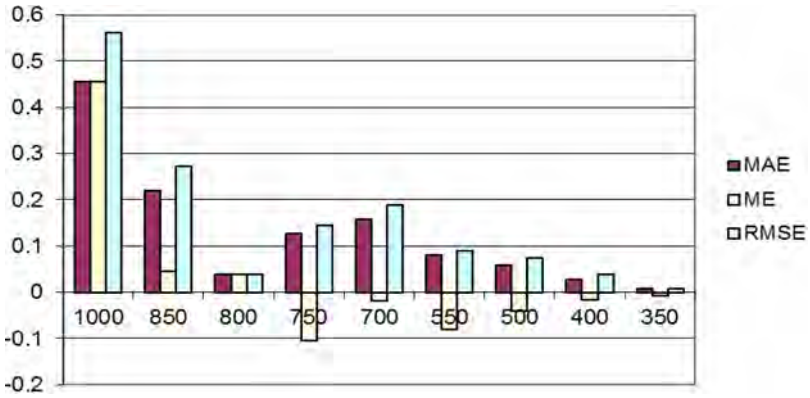


Рис. 9. Розподіл помилок прогнозу (вісь ординат) відношення суміші [г/кг] моделі WRF ARW v.2.2.1 на різних ізобаричних поверхнях (вісь абсцис)

Висновки. Сильні снігопади, як і взагалі хмари холодного періоду року, становлять практичний інтерес у розрізі можливостей використання технологій активних впливів на гідрометеорологічні процеси з метою пом'якшення проявів регіональних змін клімату та можливості ініціювання випадіння опадів до моменту підходу хмарних масивів до мегаполісів, підвищення точності прогнозу кількості опадів та збільшення завчасності прогнозу. Зважаючи на це процеси їх утворення і розвитку потребують комплексного розгляду з використанням всіх наявних методів досліджень, експериментальних даних та даних натурних вимірювань.

Вологозапас атмосфери у період опадоутворення є важливим показником масштабності процесу та потенціальної можливості атмосфери дати сильні опади. Аналіз випадків сильних снігопадів за період 2009-2013 рр. показав, що розташовані запаси вологи знаходяться у нижньому півторакілометровому шарі тропосфери. Основний резерв вологи для укрупнення снігових пластин знаходиться на висоті 400-800 м. Було проаналізовано зміни вертикального профілю абсолютної вологості у часі з дискретністю 12 год., що обумовлювалося лише частотою аерологічних зондувань, а також побудовано діаграми залежності абсолютної вологості від температури повітря та висоти. Отримано, що зі зменшенням інтенсивності снігопадів, максимум абсолютної вологості зміщується у вище розташовані по відношенню до земної поверхні шари тропосфери.

Показано, що модель WRF ARW v.2.2.1 із достатньою точністю може бути використана для досліджень і практичних задач пов'язаних із необхідністю врахування інформації про атмосферну вологу. Невідповідність між об'єктивним аналізом та фактичними даними можна пояснити великим кроком моделі по горизонталі, котрий становить 30 км (детальніше про конфігурацію розрахункової області можна дізнатися за посиланням http://accuweather.org.ua/wa221/index.php), і виникає унаслідок помилок інтерполяції з вузлів сітки до метеостанції. Виявлено, що найбільші значення помилок прогнозів атмосферної вологи спостерігаються у нижньому 1,5-кілометровому шарі та середній тропосфері.

Рецензент – кандидат географічних наук І. В. Дворецька

Література:

1. *Дроздов, О. А.* Климатология / Дроздов О. А., Васильев В. А. Кобышева Н. В. – Л. : Гидрометиздат, 1989. – 568 с.

2. Клімат України / [За ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко]. – К. : Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.

3. *Паламарчук, Л. В.* Исследование внутренней структуры фронтальных зон при помощи трехмерных полуэмпирических моделей / Л. В. Паламарчук, А. М. Пирнач // Труды УкрНИГМИ. –1992. – Вып. 243. –С. 107-124.

4. *Пірнач, Г. М.* Моделювання потужних конвективних хмар / Г. М. Пірнач, В. М. Шпиг // Геоінформатика. – 2007. – № 4. – С. 86-94.

5. *Пірнач, Г. М.* Чисельне моделювання хмар та опадів у системах атмосферних фронтов / Пірнач Г. М. – К. : Ніка-Центр, 2008. – 295 с.

6. *Пірнач, Г. М.* Чисельне моделювання термодинамічних умов формування сильних снігопадів / Пірнач Г. М, Балабух В. О., Ромаш Т. А. // Наук. пр. УкрНДГМІ. – 2011. – Вип. 260. – С. 28-45.

7. *Пірнач, Г. М.* Чисельне моделювання фронтальних хмар із сильними снігопадами / Г. М. Пірнач, Т. А. Ромаш // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2011.– Вип. 261. – С. 18-36.

8. Ромаш Т. А. Синоптичний аналіз та чисельне моделювання умов формування сильних снігопадів при проходженні середземноморських циклонів / Ромаш Т. А. // Наук. часопис НПУ ім. М. П. Драгоманова. Серія 4. Географія і сучасність. – 2011. – Вип. 14 (26). – С. 118-125.

9. *Тверской, П. Н.* Курс метеорологии (физика атмосферы) / Тверской П. Н. – Л. : Гидрометеоиздат, 1962. – 700 с.

10. *Хргиан, А. Х.* Физика атмосферы / Хргиан А. Х. – Л. : Гидрометеоиздат, 1969. – 647 с.

11. The GFS Atmospheric Model [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html.

Т. А. Ромаш, В. М. Шпиг

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАПАСА ВЛАГИ В АТМОСФЕРЕ В ПЕРИОД СИЛЬНЫХ СНЕГОПАДОВ

Исследуются особенности распределения влаги на основе данных аэрологического зондирования атмосферы во время

прохождения снегопадов над территорией Украины. Осуществлена оценка точности данных объективного анализа на стандартных изобарических поверхностях и прогностических вертикальных профилях.

Ключевые слова: водная пара, атмосфера, влагозапас, снегопад.

T. Romash, V, Shpig

THE PECULIARITIES OF STOCK MOISTURE CHANGES IN ATMOSPHERE DURING HEAVY SNOWFALLS

It is researched the peculiarities of moisture distribution which bases on aerological probe data of atmosphere during heavy snowfalls on Ukraine territory are investigated. There is estimated the data accuracy of impartial analysis on standard isobathic surfaces and prognostic vertical profiles.

Key words: water vapor, atmosphere, water stock, snowfall.

Надійшла до редакції 12 квітня 2013 р.