measurements data. Particular attention is given to the comparing measurements results of different based systems. The reasons of seasonal variations emergence by satellite data was analyzed.

Keywords: nitrogen dioxide, satellite observations, ground-based observations, emission, seasonal variation, amplitude and phase of fluctuations, cloudiness.

Дворецкая И. В., Савенец М. В., Савченко В. М. **Основные характеристики сезонно-широтного распределения диоксида азота над территорией Украины за данными наземных и спутниковых измерений.** Исследование посвящено анализу сезонной динамики и пространственного распределения диоксида азота над территорией Украины по данным наземных и спутниковых исследований. Особое внимание уделено сравнению результатов измерения за разными системами базирования. Проведён анализ причин возникновения сезонных колебаний по результатам спутниковых наблюдений.

Ключевые слова: диоксид азота, спутниковые наблюдения, наземные наблюдения, эмиссия, сезонных ход, амплитуда и фаза колебаний, облачность.

Надійшла до редколегії 01.12.2014

УДК 551.509.313.43: 551.509.313.5

Шпиг В. М.

Український гідрометеорологічний інститут

ТОЧНІСТЬ ПРОГНОЗУ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ВЕЛИЧИН І ОПАДІВ В УМОВАХ ГІРСЬКОЇ МІСЦЕВОСТІ ЗА ГІДРОСТАТИЧНОЮ ТА НЕГІДРОСТАТИЧНОЮ ЧИСЕЛЬНИМИ АТМОСФЕРНИМИ МЕЗОМАСШТАБНИМИ МОДЕЛЯМИ

Ключові слова: прогноз; модель; верифікація

Вступ. Протягом останніх десятиліть чисельні моделі прогнозу погоди утвердилися як високоефективний засіб в повсякденній оперативній практиці прогностичних центрів багатьох країн світу. Їх використання значно прискорює та спрощує процес створення різнотипної інформації для широкого кола користувачів, котрий до того ж не залежить від самопочуття прогнозиста (синоптика). Точність таких моделей, як правило, перевищує точність синоптичних прогнозів, особливо, якщо мова йде про їх просторово-часову дискретизацію. Не зважаючи на всі переваги чисельних моделей, їх створення та експлуатація несе в собі і певні труднощі, пов'язані із повнотою фізичних схем, спрощеннями та математичними методами, котрі в них використовуються, потребою в обчислювальних ресурсах та у разі використання емпіричних величин своєрідною територіально-географічною обмеженістю у використанні. Більшість із моделей цього класу потребують окремих досліджень щодо специфіки прогнозування конвективної хмарності, погодних умов у гірських та прибережних районах.

Чисельне моделювання опадів у гірських районах є досить складною проблемою, пов'язаною з рельєфом місцевості. Складність рельєфу супроводжується великою різноманітністю масштабів смуг та осередків хмар та опадів, пов'язаних з атмосферними фронтами та мікроциклонами. На окрему увагу до того ж заслуговує питання вибору фізичних схем (параметризацій фізичних процесів), джерел вхідних даних для моделі, просторово-часової дискретизації та програмного забезпечення, що, зрештою, прямим чи опосередкованим чином впливає на її експлуатаційні характеристики та якість прогнозу погоди.

Історія становлення і розвитку мезомасштабної моделі прогнозу погоди WRF та її використання в Україні. Однією з кращих за своїми експлуатаційними характеристиками і найпоширеніших чисельних мезомасштабних моделей у світі є модель WRF (*англ. The Weather Research & Forecasting Model*). Ідеї щодо

створення моделі прогнозу погоди нового покоління виникли у NCAR приблизно в 1996 році. Інформація щодо проекту WRF вперше прозвучала 23 червня 2000 року у доповіді Дж. Клемпа на 10-му симпозіумі користувачів MM5. У цьому ж році з'явилася і перша бета-версія моделі (v.1.0) [1]. Практично з 2000 по 2003 рік щороку з'являлося по одній новій версії моделі WRF ARW із подальшим їх збільшенням:

- 2001 – v.1.1;
- 2002 – v.1.2;
- 2003 – v.1.3;
- 2004 – v.2.0 (перша версія з наявністю детальної документації та супровідним обслуговуванням), 2.0.1 (21 травня 2004 р.); 2.0.2 (3 червня 2004 р.), 2.0.3 (12 листопада 2004 р.), v.2.0.3.1 (3 грудня 2004 р.);
- 2005 – v.2.1 (3 серпня 2005 р.), v.2.1.1 (8 листопада 2005 р.);
- 2006 – v.2.1.2 (30 січня 2006 р.), v.2.2 (грудень 2006 р.);
- 2007 – v.2.2.1 (31 жовтня 2007 р.);
- 2008 – v.3.0 (4 квітня 2008 р.), v.3.0.1 (6 серпня 2008 р.), v.3.0.1.1 (29 серпня 2008 р.);
- 2009 – v.3.1 (9 квітня 2009 р.), v.3.1.1 (31 липня 2009 р.);
- 2010 – v.3.2 (2 квітня 2010 р.), v.3.2.1 (18 серпня 2010 р.);
- 2011 – v.3.3 (6 квітня 2011 р.); v.3.3.1 (21 вересня 2011 р.);
- 2012 – v.3.4 (6 квітня 2012 р.); v.3.4.1 (16 серпня 2012 р.);
- 2013 – v.3.5 (18 квітня 2013 р.); v.3.5.1 (23 вересня 2013 р.);
- 2014 – v.3.6 (15 квітня 2014 р.); v.3.6.1 (14 серпня 2014 р.).

Від самого початку WRF задумувалася як модель для потреб дослідників та складання на основі її розрахунків оперативних прогнозів [1], у той же час відомі у світі ETA та MM5 створювалися для потреб оперативного прогнозування та атмосферних досліджень відповідно. Вже пізніше вони були уніфіковані для значно ширшого кола потреб наукового та практичного характеру. Модель також значно відрізняється від своїх попередниць (ETA, MM5, NGM, RUC та ін.) великим набором фізичних процесів, котрі представлені в ній, можливістю вибору великої кількості різноманітних фізичних схем та їх компонування, вищим порядком рівнянь, котрі апроксимують динаміку атмосфери. По-суті, WRF увібрала у себе все найкраще від атмосферних моделей попередніх поколінь.

Модель WRF створювалася зусиллями багатьох науково-дослідних установ США та була задумана як мезомасштабна прогностична модель та система асиміляції даних нового покоління, яка дала б змогу краще зрозуміти атмосферні процеси та суттєво покращити прогноз погоди. Для цього було залучено останні розробки в області фізики атмосфери, чисельних методах і методах асиміляції даних. Модель була розроблена спільними зусиллями Національного центру атмосферних досліджень (NCAR), Національного управління океанічних та атмосферних досліджень, Національного центру передбачення стану навколишнього середовища (NCEP), Лабораторії систем прогнозу (FSL), Погодного бюро військово-повітряних сил США (AFWA), Військово-морської науково-дослідної лабораторії США, Університету штату Оклахома, Федеральної авіаційної адміністрації США (FAA) та ряду інших наукових установ [2, 3].

WRF використовується у багатьох провідних гідрометеорологічних центрах світу. Так, наприклад, NCEP використовує цю модель в системі короткострокового ансамблевого прогнозу погоди, адаптувала її для потреб інших моделей (Hurricane Forecast Model, North American Meso Model, та Rapid Refresh Model), які застосовуються в оперативній практиці. Вона також функціонує в Південній Кореї,

Індії, Ізраїлю, Тайвані та Греції, де навіть робляться спроби на її основі створити власні національні прогностичні системи.

Модель є дієвим засобом в оперативному прогнозі на різних просторових масштабах (від хмарного до синоптичного), особливої уваги заслуговує можливість моделювання з кроком по горизонталі від 1 до 10 км. Програмне забезпечення WRF являє собою ієрархічну модульну структуру, що забезпечує прекрасну мобільність та ефективність при використанні можливостей багатопроцесорної обчислювальної техніки. Інфраструктура моделі передбачає використання декількох динамічних блоків (ядер) та цілої низки фізичних схем, двох способів реалізації вкладених сіток, трьох картографічних проекцій (полярної стереографічної, Ламберта та Меркатора).

Розвиток WRF відбувається у двох різних напрямках, відмінність яких полягає у залученні різних динамічних блоків, що описують динаміку атмосфери. Один з них — WRF NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model), котра розробляється в NCEP і являє собою продовження робіт щодо поліпшення моделі ETA, а інший — Advanced Research WRF (WRF ARW), яка має два ядра. Система рівнянь WRF ARW є Ейлерівською негідростатичною (проте є можливість використання гідростатичного наближення) та повністю стисненною, консервативною для скалярних змінних. Основними прогностичними змінними у моделі є компоненти вектору швидкості у декартовій системі координат, збурення поля потенціальної температури, збурення геопотенціалу та приземного тиску сухого повітря. До цього числа також належать турбулентна кінетична енергія та цілий низка скалярних величин: відношення суміші водяної пари, відношення суміші дощу/снігу, відношення суміші хмарної води/льоду тощо. Вертикальні координати представлені у моделі за допомогою гідростатичної ізобаричної системи координат, яка враховує вплив рельєфу, також передбачено можливість розтягнення вертикальної сітки. Вершиною моделі є постійна барична поверхня. Горизонтальна сітка являє собою сітку класу Arakawa C [4, 5].

На основі WRF ARW версії 3.0.1 було створено першу версію планетарної моделі WRF v3.0.1.2, яка дає можливість проводити розрахунки не лише для атмосфери Землі, але й Марсу, Титану, Юпітеру, Сатурну, Плуту та Венери. Так, для Марсу використовувалася для моделювання конвективних структур у примежовому шарі для масштабів у декілька десятків метрів і атмосферних систем планетарної циркуляції. Наразі для Титану вивчається формування метанових хмар і дощів на планетарному рівні. Розвиток моделі в основному фінансується за Програмою прикладних дослідницьких інформаційних систем Національного управління з аеронавтики і дослідження космічного простору США (*англ. NASA Applied Information Systems Research program*) із додатковим фінансуванням за Програмою фундаментальних досліджень Марса, Програми досліджень зовнішніх планет програм планетарних атмосферних досліджень, які також реалізуються під загальною егідою NASA. Наразі в основі поточної версії планетарної моделі WRF v3.1.1, в якій вже передбачено використання системи асиміляції даних, лежить WRF ARW v3.1.1 [6, 7].

Протягом порівняно невеликого відрізку часу (приблизно за 15 років) кількість користувачів WRF зросла від кількох одиниць на території США до тисяч державних, комерційних та приватних організацій, окремих дослідників у понад 130 країнах. Постійно зростає кількість наукових праць, присвячених вдосконаленню різноманітних фізичних схем моделей, їх апробації, використанню моделі в оперативній практиці, дослідженню фізичних процесів та кліматичних змін окремих регіонів земної кулі. Географія розповсюдження моделі охоплює весь світ, див., наприклад, [8, 9] та рис. 1-3. Значною мірою цьому сприяють наявність

досить детальної документації по моделі, високий рівень її супровідного обслуговування і щорічні наукові симпозіуми та семінари, які присвячені проблемам і питанням, пов'язаним з експлуатацією та вдосконаленням моделі.

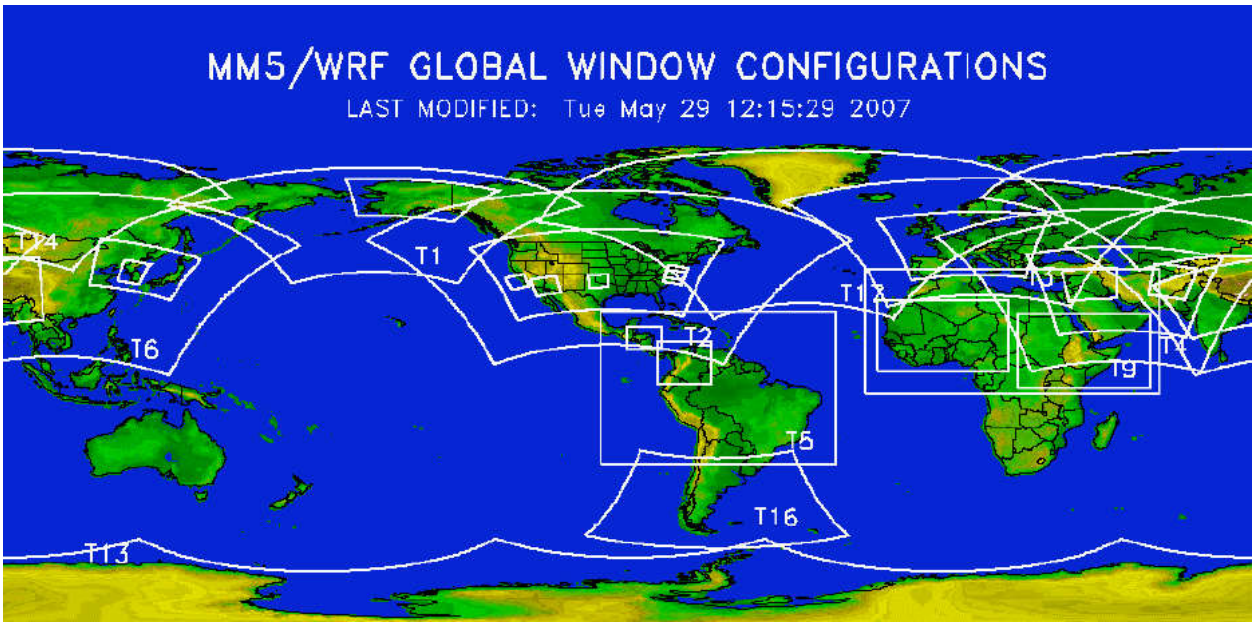

Рис. 1 – **Глобальна і регіональні області моделювання, які використовуються в акредитованих NCAR прогностичних центрах та університетах** [10]

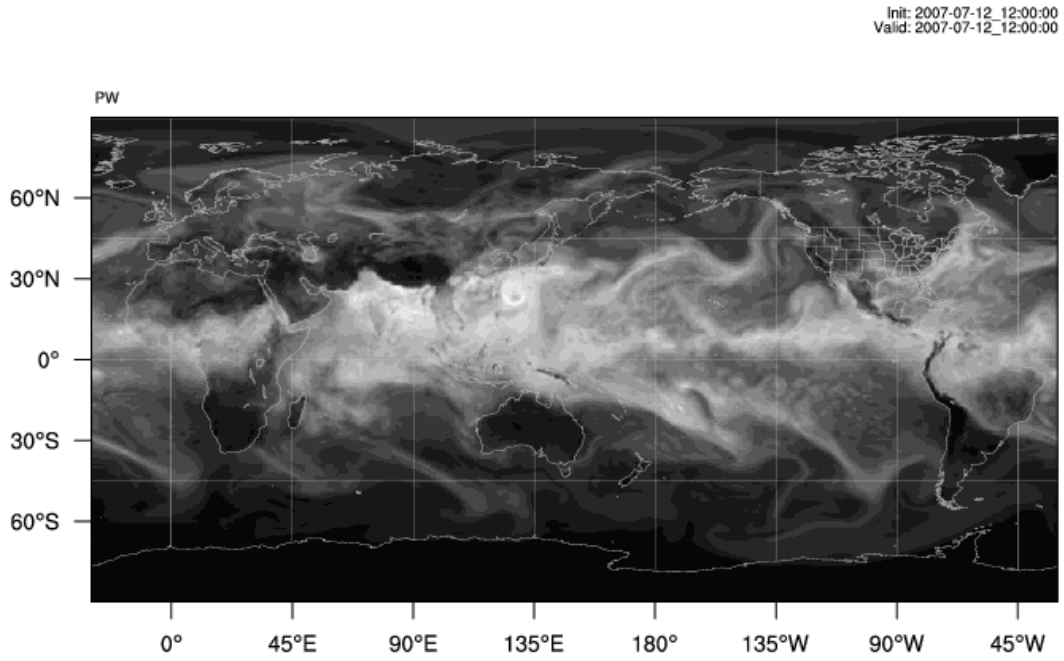

Рис. 2 **– Приклад глобального прогнозу переносу водяної пари** [3]

Рис. 3 – **Географія розташування (а) користувачів WRF з асиміляцією даних спостережень (WRF DA) та рейтинг країн за кількістю користувачів (б) станом на 07.12.2014 р.** [11]

В Україні WRF ARW та WRF NMM використовуються для різних цілей. Звісно, перш за все – це прогнози погоди. Реалізуються вони в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України (УкрГМІ) з метою забезпечення Українського гідрометеорологічного центру (УкрГМЦ) прогностичними полями метеорологічних величин та їх значеннями в окремих населених пунктах, що разом із даними інших чисельних і фізико-статистичних прогностичних моделей дає можливість забезпечувати потреби вітчизняних споживачів гідрометеорологічної інформації. Дані чисельних прогнозів УкрГМІ використовуються також в інших організаціях і структурних підрозділів ДСНС України та для різнопланових науково-прикладних досліджень [12-14]. Так, у 2012 р. відповідно до результатів загальноакадемічного конкурсу науково-технічних проектів НАН України УкрГМІ було створено і впроваджено першу чергу багатоцільової системи оцінки стану атмосфери, короткострокового прогнозу погоди та вітрохвильового режиму Чорного та Азовського морів. В основу системи було покладено моделі WRF ARW та WRF NMM версії 3.3.1, дані супутникових вимірів EUMETSAT і модель вітрового хвилювання SWAN. В якості основної моделі чисельного прогнозу використовується WRF NMM, за даними якої обчислюються прогнози напрямку, висоти і періоду хвиль, а також оцінка і прогноз умов погоди комфортних / дискомфортних для людини [15]. На даний момент система в цілому (або її окремі сегменти) використовуються в УкрГМЦ та Гідрометцентрі Чорного та Азовського морів. Іншим центром в Україні, де в режимі чотири рази на добу – сім днів на тиждень – 365 днів на рік модель WRF (лише NMM) використовується для створення прогнозів погоди, є комерційний ресурс “Метеопрог” [16]. WRF ARW застосовується для вирішення питань функціонування регіональних систем моніторингу біофізичних параметрів водних об’єктів, де в якості початкових даних використовуються супутникові знімки низької просторової роздільності приладу MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), а власне модель виступає джерелом просторових даних [17]. На основі WRF NMM було розроблено комплекс програмних засобів, який містить автоматизовані засоби візуалізації результатів розрахунків та їх статистичної обробки й уточнення з використанням нейромереж і даних вимірювань [18].

Мета, методи та результати дослідження. Однією із низки відмінностей між WRF ARW та WRF NMM є використання гідростатичного наближення у першій із них, яке теоретично при використанні малих кроків по горизонталі у гірській

місцевості може призводити до помилок у прогнозі метеорологічних величин. В УкрГМІ з лютого 2008 р. і по теперішній день використовується модель WRF ARW v. 2.2.1 [19], яка зарекомендувала себе надійним джерелом прогностичної метеорологічної інформації високої точності. У 2009 р. в УкрГМІ в оперативну експлуатацію було введено мезомасштабну атмосферну модель WRF NMM v. 3.0. Наразі в лінійці негідростатичних моделей серії WRF використовується WRF NMM v. 3.3.1 [20]. У ході експлуатації було виявлено, що WRF NMM більш точно відтворює просторові розподіли приведеного тиску, особливо у гірських районах, а також мають місце відмінності у просторових розподілах атмосферних опадів (див. рис. 4, 5). Прогнози в УкрГМІ обчислюються від одного (WRF ARW v. 2.2.1) до чотирьох разів на добу (WRF ARW/NMM v. 3.3.1): 00, 06, 12 та 18 UTC (Всесвітній координований час, год.).

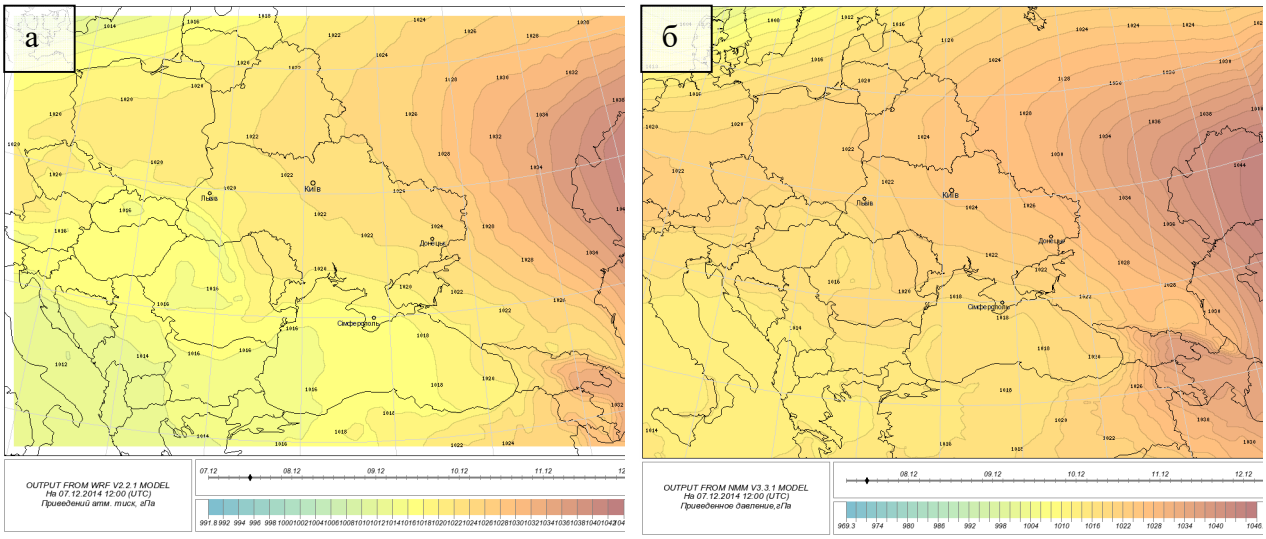

Рис. 4 **– Прогноз приведеного атмосферного тиску на 12 UTC 07.12.2014 р. за моделями WRF ARW v. 2.2.1 та WRF NMM v. 3.3.1**

Зважаючи на приведену вище інформацію, у даній роботі ставилося за **мету** – оцінити точність прогнозів температури повітря, швидкості вітру та добових сум опадів в умовах гірської місцевості, отриманих за моделями WRF ARW v. 2.2.1 та WRF NMM v. 3.3.1 для 14 метеорологічних станцій, які розташовані в межах Українських Карпат або ж поблизу них за однаковий період часу.

Порівняння прогностичних якостей моделей виконувалося шляхом аналізу величин наступних характеристик точності прогнозу [21, 22]:

- для температури повітря та швидкості вітру
  - RMSE – середня квадратична помилка;
  - RMSEc – середня квадратична помилка з урахуванням систематичної похибки;
  - MAE – середня абсолютна помилка;
  - ME – середня помилка;
- для добових та півдобових опадів
  - RMSE – середня квадратична помилка;
  - MAE – середня абсолютна помилка;
  - ME – середня помилка.

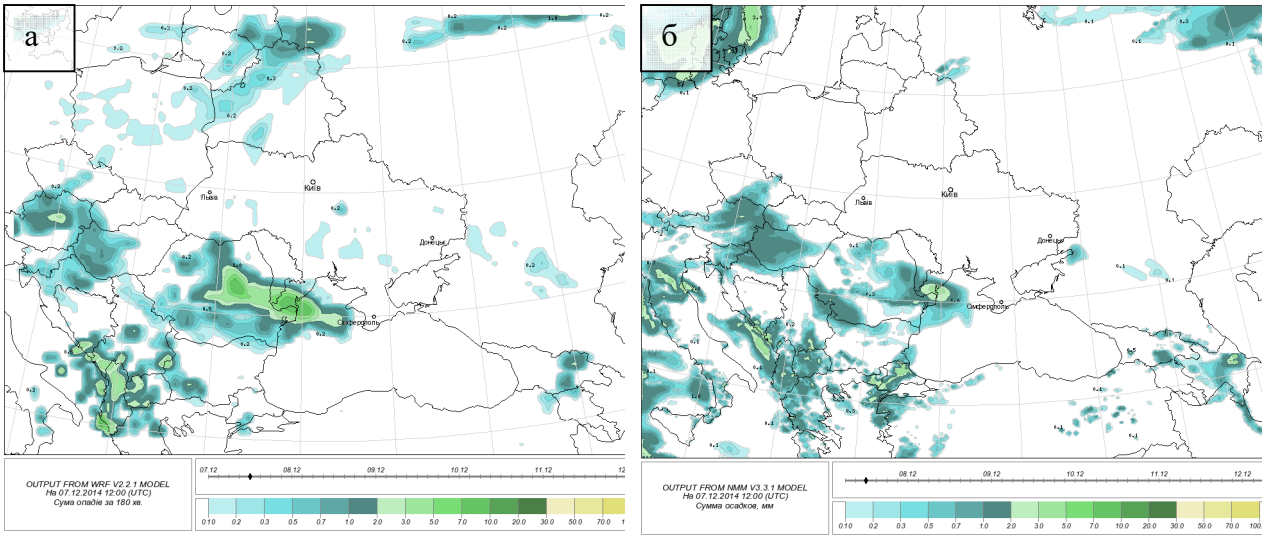

Рис. 5 **– Прогноз атмосферних опадів на 12 UTC 07.12.2014 р. за моделями WRF ARW v. 2.2.1 та WRF NMM v. 3.3.1**

З метою аналізу справджуваності (дихотомічних, або альтернативних) прогнозів опадів було використано такі характеристики, як-от:

- accuracy – точність (частка точних або загальна справджуваність прогнозів);
- biasscore – оцінка зміщення (частотне зміщення);
- hitrate – імовірність виявлення (частка влучань)
- FAR – відношення хибних тривог
- POFD – імовірність хибного виявлення (частка хибних тривог)
- TS – оцінка загрози (критичний показник успіху)
- HK – критерій *Hanssen* та *Kuiper*.

Спочатку проаналізуємо неперервні величини, якими є температура повітря та швидкість вітру для часу ініціалізації моделі 00 годин за Гринвічем (див. табл. 1-8). Помилки пронозу температури повітря в обох моделях найбільші значення мають для станцій Пожежевська та Плай, причому вони вказують на тенденцію до завищення прогнозованих значень у порівнянні із фактичними. Якщо провести осереднення ME для кожного часового інтервалу (завчасності) по всіх чотирнадцятьох станціях регіону, то отримаємо, що WRF ARW v.2.2.1 в цілому тяжіє до заниження значень температури (компенсаційним фактором виступають високогірні станції).

Для WRF NMM v.3.1.1 навпаки характерне завищення прогностичних значень температури. Щоправда воно спостерігається не на всіх станціях і характеризується значно більшими по модулю додатними значеннями ME у порівнянні із отриманими від'ємними значеннями ME. З часом вихолодження WRF ARW v.2.2.1 зменшується. Так, коли на першу добу прогнозу ME для регіону становить -0,51°C, то на третю добу 0,045°C. У той же час для WRF NMM v.3.1.1 ці величини мають значення 0,37 °C та 0,47°C. У цілому для регіону різниця між значеннями ME та MAE для обох моделей і різної завчасності є незначною. Самі значення різниці коливаються від 0,06°C (ME) та 0,07°(MAE) для першої доби прогнозу і 0,09°C (ME) та 0,05°(MAE) для третьої доби прогнозу.

Обидві моделі тяжіють до завищення значень швидкості вітру, проте WRF ARW v.2.2.1 давала більш точні прогнози, ніж WRF NMM v.3.1.1, особливо протягом першої доби.

Таблиця 1 **– Точність прогнозу температури повітря протягом першої доби моделлю WRF ARW v.2.2.1**

Характеристика точності прогнозу	RMSE	RMSEc	MAE	ME
Берегове	2,43	2,35	1,83	-0,6
Великий Березний	2,58	1,93	2,13	-1,71
Івано-Франківськ	2,1	2,06	1,61	-0,41
Коломия	2,03	2,03	1,57	0,05
Міжгір'я	2,71	2,06	2,29	-1,75
Нижні Ворота	2,42	2,08	1,95	-1,23
Нижній Студений	2,06	1,95	1,61	-0,68
Плай	4,9	3,29	4,18	3,63
Пожежевська	3,81	3,02	3,16	2,32
Рахів	3,12	2,04	2,71	-2,36
Славське	2,31	2,07	1,88	-1,04
Ужгород	2,38	2,16	1,86	-1,01
Хуст	2,37	2,18	1,9	-0,93
Яремча	2,56	2,13	2,11	-1,42

Таблиця 2 **– Точність прогнозу температури повітря протягом третьої доби моделлю WRF ARW v.2.2.1**

Характеристика точності прогнозу	RMSE	RMSEc	MAE	ME
Берегове	2,84	2,84	2,11	-0,02
Великий Березний	2,71	2,51	2,15	-1,01
Івано-Франківськ	2,56	2,56	1,86	0,14
Коломия	2,62	2,56	1,93	0,55
Міжгір'я	2,95	2,65	2,42	-1,29
Нижні Ворота	2,81	2,74	2,17	-0,62
Нижній Студений	2,5	2,5	1,89	-0,11
Плай	5,6	3,75	4,66	4,16
Пожежевська	4,32	3,38	3,56	2,7
Рахів	3,07	2,41	2,57	-1,9
Славське	2,65	2,62	2,06	-0,4
Ужгород	2,67	2,65	2,03	-0,33
Хуст	2,65	2,63	2,09	-0,34
Яремча	2,69	2,53	2,1	-0,9

Таблиця 3 **– Точність прогнозу температури повітря протягом першої доби моделлю WRF NMM v.3.1.1**

Характеристика точності прогнозу	RMSE	RMSEc	MAE	ME
Берегове	2	2	1,53	0,13
Великий Березний	2,62	2,54	2,16	-0,62
Івано-Франківськ	1,99	1,99	1,57	0,15
Коломия	2,07	2	1,64	0,54
Міжгір'я	2,64	2,58	2,14	-0,52
Нижні Ворота	2,32	2,3	1,83	-0,27
Нижній Студений	2,95	2,91	1,93	0,51
Плай	5,07	2,13	4,62	4,6
Пожежевська	3,16	1,73	2,73	2,64
Рахів	2,99	2,61	2,45	-1,46
Славське	2,64	2,64	2,07	0,16
Ужгород	1,97	1,97	1,54	0,09
Хуст	2,25	2,24	1,76	0,14
Яремча	2,2	2,02	1,75	-0,86

Таблиця 4 – **Точність прогнозу температури повітря протягом третьої доби моделлю WRF NMM v.3.1.1**

Характеристика точності прогнозу	RMSE	RMSEc	MAE	ME
Берегове	2,36	2,35	1,81	0,24
Великий Березний	2,93	2,88	2,38	-0,51
Івано-Франківськ	2,41	2,4	1,89	0,24
Коломия	2,46	2,38	1,93	0,63
Міжгір'я	2,92	2,88	2,29	-0,45
Нижні Ворота	2,66	2,66	2,11	-0,1
Нижній Студений	3,25	3,18	2,22	0,64
Плай	5,38	2,54	4,81	4,74
Пожежевська	3,44	2,19	2,86	2,65
Рахів	3,24	2,9	2,57	-1,43
Славське	2,96	2,95	2,33	0,26
Ужгород	2,37	2,36	1,83	0,23
Хуст	2,48	2,47	1,97	0,17
Яремча	2,48	2,37	1,94	-0,73

Таблиця 5 **– Точність прогнозу швидкості вітру протягом першої доби моделлю WRF ARW v.2.2.1**

Характеристика точності прогнозу	RMSE	RMSEc	MAE	ME
Берегове	2,56	1,31	2,23	2,19
Великий Березний	2,75	1,5	2,43	2,31
Івано-Франківськ	3,91	3,86	1,54	0,61
Коломия	2,12	1,58	1,69	1,42
Міжгір'я	3,89	3,19	2,66	2,22
Нижні Ворота	2,25	1,63	1,88	1,56
Нижній Студений	3,34	2,66	2,26	2,01
Плай	4,16	4,04	2,43	-0,99
Пожежевська	2,86	2,77	2,3	0,71
Рахів	2,66	1,84	2,29	1,93
Славське	2,98	1,41	2,66	2,62
Ужгород	1,93	1,68	1,56	0,94
Хуст	5,57	5,33	2,29	1,61
Яремча	3,19	1,89	2,69	2,57

Таблиця 6 – **Точність прогнозу швидкості вітру протягом третьої доби моделлю WRF ARW v.2.2.1**

Характеристика точності прогнозу	RMSE	RMSEc	MAE	ME
Берегове	2,71	1,42	2,38	2,3
Великий Березний	2,77	1,49	2,47	2,34
Івано-Франківськ	3,99	3,92	1,82	0,73
Коломия	2,34	1,81	1,9	1,49
Міжгір'я	3,89	3,2	2,74	2,22
Нижні Ворота	2,39	1,77	2	1,61
Нижній Студений	3,38	2,7	2,32	2,03
Плай	4,28	4,18	2,59	-0,9
Пожежевська	2,94	2,83	2,37	0,79
Рахів	2,8	1,98	2,43	1,98
Славське	3,08	1,52	2,71	2,67
Ужгород	2,12	1,86	1,71	1,03
Хуст	5,59	5,31	2,42	1,75
Яремча	3,21	1,93	2,67	2,56

Таблиця 7 **– Точність прогнозу швидкості вітру протягом першої доби моделлю WRF NMM v.3.1.1**

Характеристика точності прогнозу	RMSE	RMSEc	MAE	ME
Берегове	2,89	1,37	2,57	2,54
Великий Березний	3,21	1,67	2,83	2,75
Івано-Франківськ	4,56	4,47	1,84	0,92
Коломия	4,43	4,21	1,98	1,37
Міжгір'я	3,85	2,98	2,83	2,44
Нижні Ворота	2,81	1,84	2,36	2,12
Нижній Студений	3,9	3,03	2,73	2,46
Плай	3,78	3,76	2,36	-0,38
Пожежевська	2,77	2,68	2,24	0,7
Рахів	3,8	3,29	2,43	1,91
Славське	3,43	1,74	3,01	2,96
Ужгород	2,1	1,62	1,7	1,33
Хуст	4,97	4,55	2,47	2,01
Яремча	3,03	1,97	2,47	2,3

Таблиця 8 – **Точність прогнозу швидкості вітру протягом третьої доби моделлю WRF NMM v.3.1.1**

Характеристика точності прогнозу	RMSE	RMSEc	MAE	ME
Берегове	2,96	1,41	2,63	2,6
Великий Березний	3,22	1,77	2,82	2,69
Івано-Франківськ	4,65	4,54	2,05	1,03
Коломия	4,52	4,28	2,15	1,44
Міжгір'я	3,82	2,95	2,86	2,44
Нижні Ворота	2,87	1,99	2,44	2,07
Нижній Студений	3,89	3,02	2,76	2,44
Плай	3,97	3,95	2,56	-0,42
Пожежевська	2,95	2,84	2,39	0,77
Рахів	3,86	3,31	2,55	1,98
Славське	3,46	1,76	3,05	2,98
Ужгород	2,24	1,83	1,81	1,28
Хуст	5	4,56	2,52	2,05
Яремча	3,09	1,92	2,57	2,41

Виявилося, що для першого з двох періодів, які розглядалися, для станцій Карпатського регіону прогноз факту випадання опадів WRF ARW v.2.2.1 є кращим, ніж WRF NMM v.3.1.1. WRF ARW v.2.2.1 також має вищу точність прогнозу кількості опадів, ніж WRF NMM v.3.1.1. Епізодичні флуктуації критеріїв успішності і точності прогнозу між моделями в сторону покращення (погіршення) для окремо взятої завчасності прогнозу і станції пов'язані із відтворенням ними опадів зливового характеру. Подібного роду природу мають і покращення прогнозу опадів із збільшенням завчасності.

Результати верифікації прогнозу опадів приведені у табл. 9-11. Варто зауважити, що ідеальний результат досягається при наступних значеннях критеріїв справджуваності прогнозу: accuracy=1; biasscore=1 (значення можуть коливатися від 0 до нескінченності); hitrate=1; FAR=0; POFD=0; TS=1; HK (значення можуть коливатися від -1 до +1; 0 вказує на відсутність зв'язку між прогнозом та спостереженнями, -1 – на обернений зв'язок між прогнозом та спостереженнями, що може бути використано для корекції прогнозу; +1 – ідеальний прогноз); RMSE= MAE= ME=0.

Таблиця 9 **– Справджуваність і точність прогнозу опадів (Берегове) різної завчасності за період з 19.04.2010 по 22.10.2011 р.**

Характеристика	WRF ARW v.2.2.1			WRF NMM v.3.1.1		
	Завчасність, год.					
	24	48	72	24	48	72
accuracy	0,670	0,678	0,647	0,596	0,563	0,516
biasscore	1,374	1,207	1,222	1,547	1,512	1,537
hitrate	0,739	0,665	0,631	0,724	0,657	0,611
FAR	0,462	0,449	0,484	0,532	0,566	0,603
POFD	0,370	0,315	0,344	0,479	0,490	0,539
TS	0,452	0,431	0,396	0,397	0,354	0,317
HK	0,369	0,350	0,287	0,246	0,167	0,072
RMSE	5,488	4,967	6,185	5,832	6,385	6,173
MAE	2,586	2,359	2,826	3,031	3,263	3,230
ME	0,061	-0,297	-0,430	-0,084	0,0143	-0,203

Таблиця 10 **– Справджуваність і точність прогнозу опадів (Хуст) різної завчасності за період з 19.04.2010 по 22.10.2011 р.**

Характеристика	WRF ARW v.2.2.1			WRF NMM v.3.1.1		
	Завчасність, год.					
	24	48	72	24	48	72
accuracy	0,649	0,629	0,676	0,641	0,580	0,576
biasscore	1,332	1,265	1,247	1,565	1,475	1,502
hitrate	0,731	0,673	0,722	0,839	0,717	0,726
FAR	0,451	0,468	0,421	0,464	0,514	0,516
POFD	0,407	0,401	0,356	0,492	0,514	0,526
TS	0,457	0,423	0,474	0,486	0,408	0,409
HK	0,324	0,271	0,366	0,346	0,204	0,201
RMSE	6,853	7,135	6,776	6,708	7,550	7,444
MAE	3,513	3,550	3,258	3,553	4,091	4,116
ME	0,071	-0,242	-0,391	0,381	0,413	0,204

Таблиця 11 **– Справджуваність і точність прогнозу опадів (Плай) різної завчасності за період з 19.04.2010 по 22.10.2011 р.**

Характеристика	WRF ARW v.2.2.1			WRF NMM v.3.1.1		
	Завчасність, год.					
	24	48	72	24	48	72
accuracy	0,764	0,751	0,741	0,674	0,593	0,553
biasscore	1,122	1,112	1,105	1,231	1,252	1,261
hitrate	0,841	0,823	0,810	0,810	0,745	0,712
FAR	0,251	0,260	0,267	0,342	0,405	0,435
POFD	0,323	0,331	0,339	0,482	0,580	0,630
TS	0,656	0,639	0,626	0,570	0,494	0,460
HK	0,518	0,492	0,472	0,328	0,165	0,082
RMSE	8,007	8,356	9,500	9,044	10,321	10,177
MAE	3,697	3,868	4,511	4,492	5,545	5,445
ME	-1,024	-1,128	-1,133	-1,017	-0,852	-1,090

В цілому для обох моделей характерним є погіршення загальної успішності із зменшенням завчасності прогнозу. Прогноз опадів (як й інших метеорологічних параметрів) є гіршим для високогірних станцій, ніж для станцій, котрі мають відносно невелику висоту над рівнем моря.

З метою додаткової оцінки успішності прогнозів також розраховувалися показники, котрі наразі використовуються у гідрометеорологічній сфері Російської Федерації [23, 24]:

- **AabsP** = (corneg/forno) – справджуваність прогнозу факту відсутності опадів, де corneg – число прогнозів відсутності опадів, котрі справдилися, forno – число прогнозів відсутності опадів;
- **AprP** = (hits/foryes) – справджуваність прогнозу наявності опадів, де hits – число прогнозів факту наявності опадів, котрі виправдалися, foryes – число прогнозів наявності опадів;
- **PfabsP** = (cornegr/obsno) – попереджуваність факту відсутності опадів, де corneg – число прогнозів відсутності опадів, котрі справдилися, obsno – число випадків без опадів, котрі спостерігалися на мережі;
- **PfprP** = (hits/obsyes) – попереджуваність факту наявності опадів, де hits – число прогнозів факту наявності опадів, котрі виправдалися, obsyes – число випадків з опадами, котрі спостерігалися на мережі.

Другий період, результати розрахунків для якого приведені у табл. 12-14, охоплював серпень – листопад 2012 р. Йому передувало введення в оперативну експлуатацію низки змін до конфігурації моделей, як елементів їх адаптації до території України. Наведені нижче результати показують перш за все ефективність вищезгаданої адаптації моделі, але і не виключають покращення якості вхідних даних глобальної моделі.

Таблиця 12 **– Справджуваність і точність прогнозу опадів (Берегове) різної завчасності за період з 01.08.2012 по 30.11.2012 р.**

Характеристика	WRF ARW v.2.2.1			WRF NMM v.3.3.1		
	Завчасність, год.					
	24	48	72	24	48	72
accuracy	0,800	0,783	0,725	0,850	0,825	0,717
biasscore	1,800	1,615	1,852	1,400	1,577	1,889
hitrate	0,920	0,808	0,815	0,840	0,885	0,815
FAR	0,489	0,500	0,560	0,400	0,439	0,569
POFD	0,232	0,223	0,301	0,147	0,191	0,312
TS	0,489	0,447	0,400	0,538	0,523	0,393
ETS	0,362	0,314	0,246	0,432	0,402	0,236
HK	0,688	0,584	0,514	0,693	0,693	0,503
AabsP	0,973	0,936	0,929	0,953	0,962	0,928
AprP	0,511	0,500	0,440	0,600	0,561	0,431
PfabsP	0,768	0,777	0,699	0,853	0,809	0,688
PfprP	0,920	0,808	0,815	0,840	0,885	0,815
RMSE	1,298	2,992	2,250	2,419	3,426	3,011
MAE	0,485	1,106	0,855	0,615	1,103	1,282
ME	0,182	0,569	0,212	0,240	0,545	0,520

Таблиця 13 **– Справджуваність і точність прогнозу опадів (Хуст) різної завчасності за період з 01.08.2012 по 30.11.2012 р.**

Характеристика	WRF ARW v.2.2.1			WRF NMM v.3.3.1		
	Завчасність, год.					
	24	48	72	24	48	72
Accuracy	0,825	0,817	0,792	0,875	0,783	0,767
Biasscore	1,361	1,333	1,351	1,250	1,444	1,432
Hitrate	0,889	0,861	0,838	0,917	0,861	0,838
FAR	0,347	0,354	0,380	0,267	0,404	0,415
POFD	0,202	0,202	0,229	0,143	0,250	0,265
TS	0,604	0,585	0,554	0,688	0,544	0,525
ETS	0,452	0,430	0,384	0,565	0,372	0,344
HK	0,687	0,659	0,609	0,774	0,611	0,573
AabsP	0,944	0,931	0,914	0,960	0,926	0,910
AprP	0,653	0,646	0,620	0,733	0,596	0,585
PfabsP	0,798	0,798	0,771	0,857	0,750	0,735
PfprP	0,889	0,861	0,838	0,917	0,861	0,838
RMSE	2,824	2,915	3,786	2,967	4,090	4,419
MAE	1,068	1,219	1,607	1,172	1,833	2,002
ME	-0,123	0,202	-0,175	-0,195	0,452	0,457

Таблиця 14 – **Справджуваність і точність прогнозу опадів (Плай) різної завчасності за період з 01.08.2012 по 30.11.2012 р.**

Характеристика	WRF ARW v.2.2.1			WRF NMM v.3.3.1		
	Завчасність, год.					
	24	48	72	24	48	72
accuracy	0,750	0,692	0,675	0,850	0,775	0,725
biasscore	1,500	1,510	1,460	1,125	1,184	1,260
hitrate	0,938	0,878	0,840	0,875	0,816	0,800
FAR	0,375	0,419	0,425	0,222	0,310	0,365
POFD	0,375	0,437	0,443	0,167	0,254	0,329
TS	0,600	0,538	0,519	0,700	0,597	0,548
ETS	0,351	0,257	0,229	0,531	0,377	0,294
HK	0,562	0,441	0,397	0,708	0,563	0,471
AabsP	0,938	0,870	0,830	0,909	0,855	0,825
AprP	0,625	0,581	0,575	0,778	0,690	0,635
PfabsP	0,625	0,563	0,557	0,833	0,746	0,671
PfprP	0,938	0,878	0,840	0,875	0,816	0,800
RMSE	7,986	8,318	8,739	6,649	7,939	8,689
MAE	2,809	3,256	3,851	2,174	2,515	3,357
ME	-1,198	-0,819	-0,46	-1,539	-1,302	-1,419

Якість і точність прогнозу опадів за моделями значно зросли у порівнянні із періодом 2010-2011 рр. За кількістю точних прогнозів (accuracy) WRF NMM була дещо кращою, ніж WRF ARW. Обидві моделі тяжіють до перестрахування (biasscore >1). Це також підтверджується FAR, яка вказує на те, що у приблизно у 20-57% (у залежності від завчасності) прогнозів випадків факту випадіння опадів, вони не спостерігалися. У той же час прогноз випадків факту відсутності опадів (POFD) був помилковим також у 15-45 %. Оцінка загрози (критичний показник успіху, TS) вказує на те, що частка спостережених та/або прогнозованих явищ, які були правильно передбачені була достатньо великою. Об'єктивна оцінка загрози (оцінка успішності Гілберта, ETS) відповідність прогнозів наявності явища фактично наявним явищам, які спостерігалися (з урахуванням впливу випадкових

прогнозів наявності явищ, що справдилися). Діапазон її значень коливається від −1/3 до 1, причому 0 – відсутність успішності, а 1 – найкраща величина. Критерій успішності Пірсі-Обухова (дискримінант Хенссена і Кіперса, НК) дає можливість оцінити наскільки добре прогнозуються наявність явищ та їх відсутність. Розраховані величини критерію Пірсі-Обухова лежать у діапазоні від -1 до 1, причому 0 – відсутність успішності, 1 – найкраща успішність. Він не залежить від кліматичної повторюваності явища. Для рідкісних подій НК спостерігається надмірне зміщення у бік першого доданку і за своїми значеннями він наближається до такої характеристики, як імовірність виявлення (частка влучань) [22].

На рис. 6-7 наведено осереднені по площі добові суми опадів та щодобові суми опадів для окремих метеостанцій прогнозовані за допомогою моделей WRF NMM v.3.3.1 (nmm), WRF ARW 2.2.1 (ar2) WRF ARW 3.3.1 (ar3) та спостерігалися на мережі метеорологічних станцій Закарпатської області (bdt). Візуальний метод дає можливість отримати чітке уявлення проте те, яким є прогноз опадів: завищення чи заниження їх кількості, розподіл помилок в межах частини доби і т.п. Із рис. 6 видно, що основна (за часткою) доля помилок у всіх моделях спостерігається у випадках, коли мають місце слабкі і помірні опади. Добре узгоджуються із даними спостережень сильні опади, проте помилки у прогнозах кількості опадів, які випадають протягом доби, роблять найбільший вклад у значення характеристик, котрі описують точність прогнозів опадів. Беручи до уваги важливість сильних опадів для прогнозів паводків на гірських річках і на достатньо високе їх виявлення, можна стверджувати, що моделі придатні для використання при вирішення гідрологічних задач.

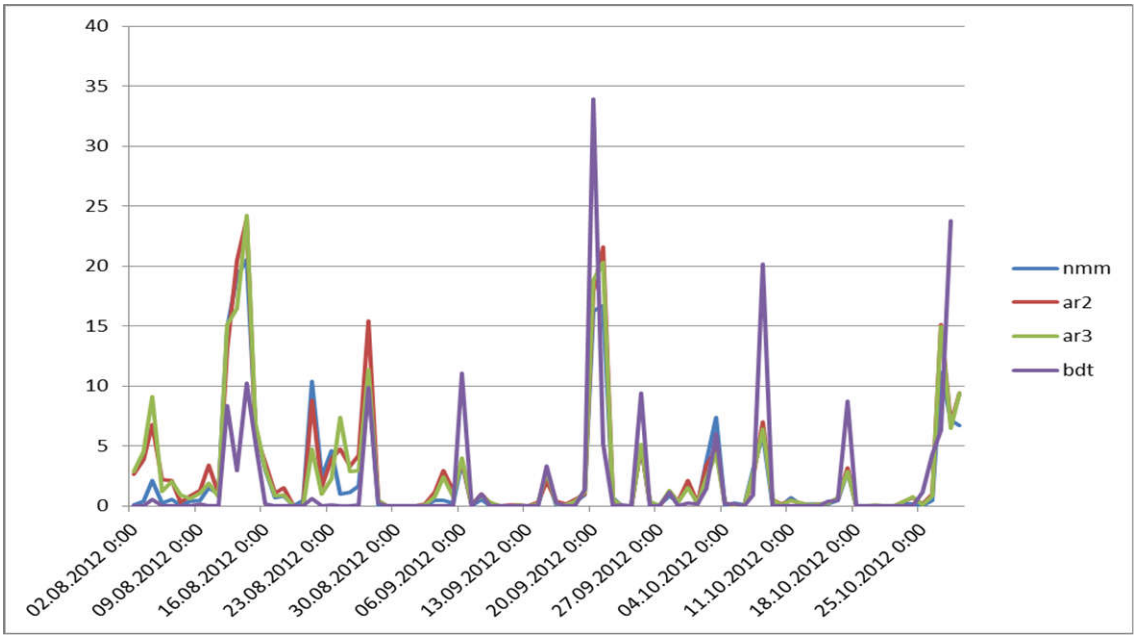

Рис. 6 – **Осереднена по площі кількість добових опадів протягом періоду серпень-жовтень 2012 р.**

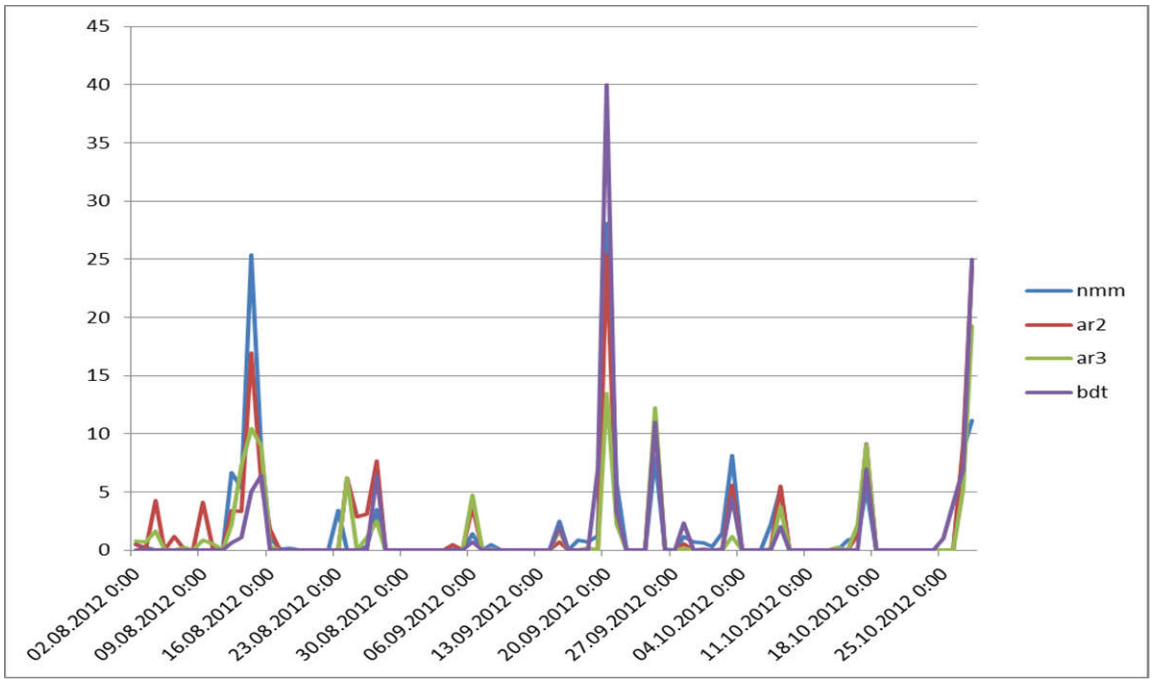

Рис. 7 – **Добова сума опадів (метеостанція Хуст) протягом періоду серпень-жовтень 2012 р.**

Висновки. Проведена оцінка якості і точності негідростатичної і гідростатичної моделей WRF для регіону Українських Карпат дає можливість стверджувати, що на сітці із кроками по горизонталі понад 10 км WRF ARW v.2.2.1 в цілому тяжіє до заниження значень температури, а для WRF NMM v.3.1.1 навпаки характерне завищення прогностичних значень температури. Прогноз температури WRF NMM v.3.1.1 більш точний, ніж WRF ARW v.2.2.1, але ця різниця становить десяті долі градуса. Обидві моделі тяжіють до завищення значень швидкості вітру, проте WRF ARW v.2.2.1 давала більш точні прогнози, ніж WRF NMM v.3.1.1, особливо протягом першої доби.

Проведені в УкрГМІ роботи щодо адаптації моделі до території України дозволили дещо підвищити якість прогнозу опадів і покращити їх точність. Точність (частка точних або загальна справджуваність) прогнозів опадів (факту випадіння / відсутності) перевищувала 67 % навіть на третю добу. Графічний аналіз даних щодо фактичних і прогнозованих опадів показав, що обидві моделі дають можливість завчасно прогнозувати факти випадіння сильних опадів в межах доби.

Подальших більш детальних досліджень потребують питання щодо мінливості якості і точності прогнозів протягом року (оскільки очевидним є факт її наявності) та оцінки якості і точності прогнозів опадів за градаціями опадів (слабкі, помірні, сильні) тощо.

Список літератури

1. *Knievel J.* The WRF model [Електронний ресурс] / J. Knievel // ATEC Forecasters Conference, July and August 2005 : Pres. and Abs. – Boulder, USA. – Режим доступу : http://www.ral.ucar.edu/projects/armyrange/references/ forecastconf_8_05/10_wrf_vs_mm5.pdf **2.** ARW version 2 modeling system user's guide / [W. Wang, D. Barker, J. Bray and other] // NCAR – 2007. – 192 p. **3.** ARW version 3 modeling system user's guide / [W. Wang, C. Bruyère, M. Duda and other] // NCAR – 2008. – 264 p. **4.** A description of the Advanced Research WRF Version 2 / [W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia and other] // NCAR TECHNICAL NOTE: NCAR/TN–468+STR. – 2007. – 88 p. **5.** A description of the Advanced Research WRF Version 3 / [W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia and other] // NCAR TECHNICAL NOTE: NCAR/TN–475+STR. – 2008. – 113 p. **6.** http://planetwrf.com/ **7.**

http://ashimaresearch.com/ **8.** http://www.wrf-model.org/index.php **9.** http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/forecasts.html **10.** *Huang Xiang-Yu.* WRFDA 2009 overview. [Електронний ресурс] / Xiang-Yu Huang // 10th WRF Users' Workshop, NCAR, 23-26 June 2009: Pres. and Abs. – Boulder, USA. – Режим доступу до журн. :**11.** http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/index.html **12.** Оценка переходов энергии в атмосфере по данным численного моделирования / Д. В. Пишняк, Г. П. Ивус, В. М. Шпиг, И. В. Будак // Вісник Одеського держ. екологічного ун-ту. – 2010. – Вип. 10. – С. 112-119. **13.** Расчет доступной потенциальной энергии на основе данных региональной модели атмосферы WRF-ARW / Д. В. Пишняк, Г. П. Ивус, В. М. Шпиг, И. В. Будак // Укр гідрометеорологічний журн. – 2010. – № 6. – С. 130-137. **14.** *Shpyg V.* Evaluation of thermodynamic fields forecast accuracy for different physical schemes in the WRF ARW model / V. Shpyg, I. Budak // Fifth International Verification Methods Workshop : 1-7 December 2011 : Abstracts, CAWCR Technical Report No. 046. – Melbourne (Australia), 2011. – P. 66. **15.** http://ws.uhmi.org.ua/ **16.** http://www.meteoprog.ua/ru/ **17.** Мониторинг водных ресурсов на основе интеграции разнородных данных и высокопроизводительных вычислений / А. Н. Кравченко, Н. Н. Куссуль, Е. А. Лупня и др.. // Кибернетика и системный анализ. – 2008. – № 4. – С. 179-188. **18.** Система численного прогноза погоды WRF-Украина / А. М. Гузий, И. В. Ковалец, А. А. Кущан, М. И. Железняк // Математичні машини і системи. – 2008. – № 4. – С. 123-131. **19.** http://accuweather.org.ua/wa221/ **20.** http://accuweather.org.ua/wn331x/ **21.** Методические указания по проведению оперативных испытаний новых методов гидрометеорологических прогнозов / [Под ред. А. И. Угрюмова]. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 102 с. **22.** Recommendations for the verification and intercomparison of QPFs and PQPFs from Operational NWP Models. – WMO TD No. 1485, 2009. – 37 p. **23.** Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиографических прогнозов. Р.Д. 52.27.284-91. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. **24.** Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения. Р.Д. 52.88.629-2002. – Л.: Гидрометеоиздат, 2002.

Шпиг В. М. **Точність прогнозу термодинамічних метеорологічних величин і опадів в умовах гірської місцевості за гідростатичною та негідростатичною чисельними атмосферними мезомасштабними моделями.** У статті приведено інформацію щодо історії виникнення і подальшого розвитку чисельної мезомасштабної моделі WRF, яка наразі має найстрімкіший розвиток і набула широкого використання. Приведено результати проведеної порівняльної оцінки точності прогнозів приземної температури повітря, швидкості вітру та добових сум опадів WRF ARW та WRF NMM із просторовими кроками по горизонталі понад 10 км для регіону Українських Карпат. Показано, що моделі можуть бути використані для різнопланових задач, вирішення яких потребує інформації про атмосферні опади.

Ключові слова: прогноз; модель; верифікація.

Shpyg V. M. **The accuracy of forecast of the thermodynamic meteorological parameters and precipitation in mountainous terrain by hydrostatic and non-hydrostatic mesoscale atmospheric numerical models.** The article provides information on the history and further development of numerical mesoscale model WRF, which has now the most rapid development and a wide range of applications. Here are presented the results of the comparative assessment of the accuracy of forecasts of 2m air temperature, 10 m wind speed and daily precipitation obtained by WRF ARW and WRF NMM with spatial steps horizontally more than 10 km to the region of the Ukrainian Carpathians. It is shown that the models can be used for various tasks, which requires information about precipitation.

Keywords: forecast; model; verification.

Шпиг В. М. **Точность прогноза термодинамических метеорологических величин и осадков в условиях горной местности по гидростатической и негидростатической численных атмосферных мезомасштабных моделях.** В статье приведена информация об истории возникновения и дальнейшего развития численной мезомасштабной модели WRF, имеющей ныне наиболее стремительное развитие и широкий круг применения. Приведены результаты проведенной сравнительной оценки

точности прогнозов приземной температуры воздуха, скорости ветра и суточных сумм осадков WRF ARW и WRF NMM с пространственными шагами по горизонтали более 10 км для региона Украинских Карпат. Показано, что модели могут быть использованы для различных задач, решение которых требует информации об атмосферных осадках.

Ключевые слова: прогноз; модель; верификация.

Надійшла до редколегії 24.11.2014

УДК 551.574.4 +551.515.9

Пясецька С. І.
Український гідрометеорологічний інститут

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ВІДКЛАДЕНЬ ОЖЕЛЕДІ КАТЕГОРІЇ НЯ ТА СГЯ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ПРОТЯГОМ 2011-2013 рр. ТА ПОЧАТКУ 2014 р.

Ключові слова: ожеледь, ожеледний станок, відкладення ожеледі небезпечного та стихійного характеру

Вступ Ожеледо-паморозеві відкладення категорії НЯ (небезпечні) та СГЯ (стихійні) є дуже несприятливим погодним явищем для більшості регіонів Європи і зокрема України. Вони суттєво впливають на функціонування ряду ланок господарського комплексу країни - у першу чергу на енергетику, транспорт та комунальне господарство, перешкоджаючи сталому розвитку цих галузей і призводять до істотних матеріальних втрат. Дослідженням особливостей виникнення та характеру розповсюдження відкладень ожеледі категорії на території України займалися ряд визначних вчених – Кошенко О.М., Волеваха В.М., Раєвській А.М., Бабіченко В.М. Проте в наслідок зміни клімату такі дослідження необхідно продовжити для визначення сучасного стану розвитку цих явищ на території України, змін у їх розповсюджені, встановлення особливостей їх динаміки у сучасних умовах, а також визначення найбільш уразливих регіонів у країні, які потерпають від них.

Об’єкт, предмет та мета дослідження. *Об’єктом* представленого дослідження і, є відкладення ожеледі на дротах стандартного ожеледного станка категорії НЯ (діаметр відкладень 6-19 мм) та категорії СГЯ (діаметр відкладення ≥20 мм) *Предметом дослідження* є сучасний стан (протягом останніх років – 2011-2013 рр. та початку 2014 р.) відкладення ожеледі категорії НЯ та СГЯ на дротах ожеледного станка на території України. *Метою дослідження* стало характер та особливості розповсюдження цих відкладень на території України протягом останніх років, а також їх масовий прояв по території держави.

Огляд стану проблеми. Найбільш докладно особливості та стан розповсюдження ожеледо-паморозевих утворень і зокрема ожеледі на території України протягом кінця 30-х – 60-х років XX століття представлено у роботах [4, 6, 7]. Було визначено, що найбільшої повторюваності це явище набуває протягом грудня – лютого і максимального свого прояву досягає в районі Донецького кряжу, Приазовської височини, Кримських горах (захід), Волино-Подільській та Придніпровській височинах, Карпатах (північно-східні схили та високогір’я). Найбільш часто небезпечні відкладення ожеледі мали місце в районі Донецького кряжу, Приазовської височини та Криму. Наступний етап дослідження цього питання охоплює період з кінця 60-х XX століття по його кінець [5, 9]. У цей час увага приділялась не тільки продовженню дослідження просторового розповсюдження ожеледі, а й її небезпечних та стихійних проявів. За вірогідністю прояву відкладень ожеледі стихійного характеру (діаметр ≥20 мм) на Україні за охопленням території у вищезгаданих дослідженнях було виділено 4 райони: *1* –