

ОПЕРАТИВНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ПОЛІВ ДЛЯ СИСТЕМ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПРО ПАВОДКИ У КАРПАТАХ

*Інститут проблем математичних машин та систем НАН України, Київ, Україна

Анотація. Представлені результати адаптації системи оперативного метеорологічного прогнозування WRF-Україна для забезпечення систем попередження про паводки в українських частинах басейнів річок Прут та Сирет прогностичними полями опадів на детальній сітці, що дозволяє врахувати орографічний вплив місцевості (Карпати) на випадіння опадів. Представлено результати верифікації моделі на підставі даних вимірювань, зібраних під час катастрофічного паводку, що відбувся у червні 1969 р.

Ключові слова: чисельний прогноз погоди, екстремальні опади, паводки, системи підтримки рішень.

Аннотация. Представлены результаты адаптации системы оперативного метеорологического прогнозирования WRF-Украина для обеспечения систем предупреждения паводков в украинских частях бассейнов рек Прут и Сирет прогностическими полями осадков на детальных сетках, что позволяет учесть орографическое влияние местности (Карпаты) на выпадение осадков. Представлены результаты верификации модели на основе данных измерений, собранных во время катастрофического паводка, который произошёл в июне 1969 г.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, экстремальные осадки, паводки, системы поддержки решений.

Abstract. This work presents the results of adaptation of the operational numerical weather forecasting system WRF-Ukraine for calculation of the detailed precipitation fields to be used in flood warning systems in the Ukrainian parts of the Prut and Siret basins. This allows taking into account the influence of the orography (Carpathians) on precipitation in this region. The results of model verification using measurements collected during the catastrophic flood in June 1969 are presented.

Keywords: numerical weather forecasting, extreme precipitation, floods, decision support systems.

1. Вступ

Своєчасне попередження населення про паводки базується на метеорологічних та гідрологічних прогнозах, які виробляються сучасними гідрометеорологічними моделями. Такі моделі розраховують майбутні значення опадів на території водозборів, витрат та рівнів води у річках. Метеорологічне прогнозування здійснюється на підставі розв'язання рівнянь гідротермодинаміки атмосфери (наприклад, у моделі WRF [1]), що дозволяє врахувати велике різноманіття процесів, таких як фронтальні циркуляції, утворення купчастої хмарності, орографічне підсилення опадів. Розраховані дані метеорологічних прогнозів використовуються гідрологічними моделями. У минулому [2] для невеликих водозборів гірських річок у Карпатах застосовувались здебільшого моделі із зосередженими параметрами, які використовували значення прогностичних опадів та інших метеорологічних змінних, розрахованих у місцях розташування метеостанцій. Це надавало можливість використання різноманітних методів статистичного постпроцесінгу даних прогнозування (таких як нейронні мережі) для уточнення даних прогнозування у місцях, де наявні відповідні історичні дані гідрометеорологічних вимірювань. Останнім часом більш популярним стає використання гідрологічних моделей з розподіленими параметрами, оскільки такі моделі є більш обґрунтованими і потребують значно меншої кількості даних вимірювань для калібрування. Проте використання гідрологічних моделей з розподіленими параметрами вимагає використання розподілених у часі та у просторі про-

гностичних полів метеорологічних змінних. Це, у свою чергу, підвищує вимоги до якості прогнозування метеорологічних полів, яка може бути досягнута насамперед за рахунок збільшення просторового дозволу метеорологічних моделей [3].

Отже, метою даної роботи є розробка оперативної системи прогнозування метеорологічних полів на детальній сітці, що дозволяє врахувати орографічний вплив місцевості на виникнення опадів. У статті представлено також результати верифікації моделей, що використовуються на підставі даних вимірювань, зібраних під час катастрофічного паводку, що стався у червні 1969 р.

2. Система метеопрогнозу WRF-Україна

На рис. 1 схематично представлені основні компоненти системи WRF-Україна та виконувани ними дії. На етапах 1, 2 обчислення автоматично запускаються планувальником завдань cron (система працює в OS Linux). Спочатку (етап 1) із серверів NOMADS за допомогою програми (Download client), реалізованої в Java, проводиться завантаження прогностичних даних глобальної моделі прогнозу погоди з серверів NOMADS [4] у форматі GRIB. Далі (етап 2) запускається WRF-Launcher – програма оточення, написана на Python, яка формує конфігураційні файли для двох основних підпрограм WRF: WPS і WRF і потім запускає ці програми на виконання.

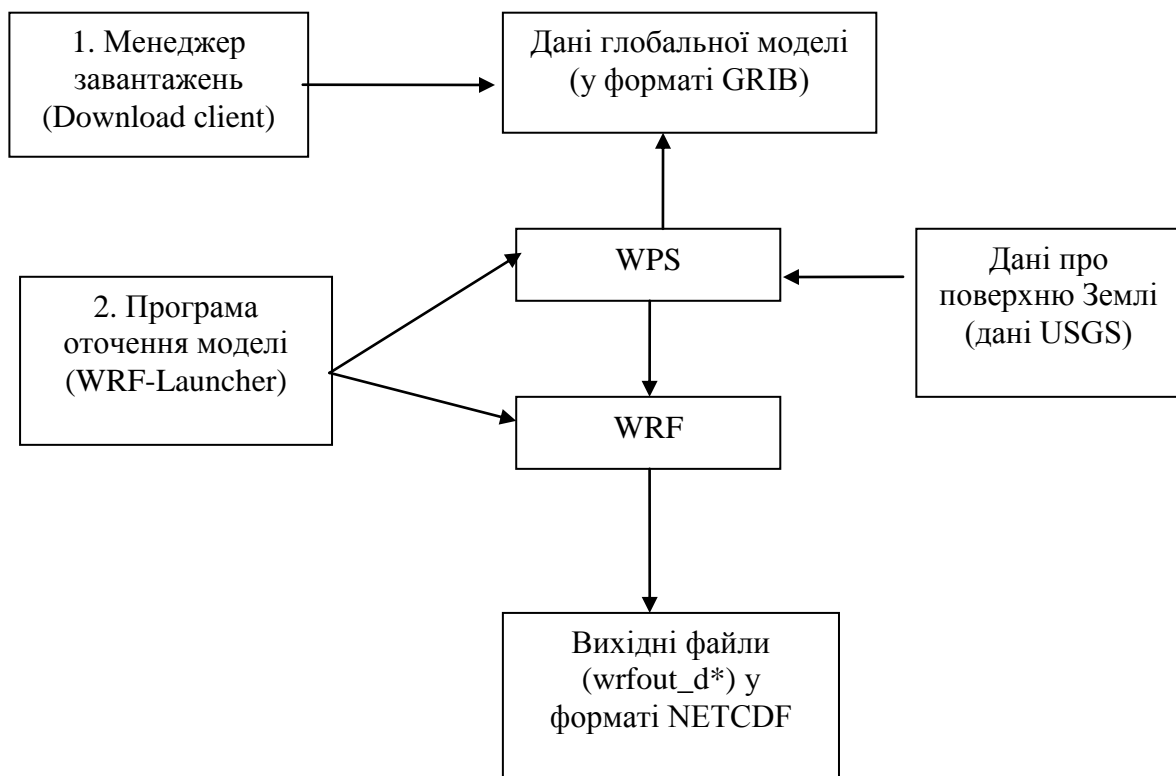


Рис. 1. Загальна схема роботи WRF-Україна

Програмний модуль WPS розташовується у $\$WRFHOME/WPS$, де $\$WRFHOME$ – умовна назва папки, в якій розташовується WRF-Україна. Функції WPS включають:

- 1) визначення обчислювальної області, формування обчислювальної сітки;
- 2) інтерполяція даних про поверхню Землі (наприклад, типів ґрунту) на обчислювальну сітку;
- 3) горизонтальна інтерполяція метеорологічних даних моделі глобального прогнозу погоди, в якій використовується більш груба сітка, на нову сітку;

4) вертикальна інтерполяція усіх метеорологічних змінних з рівнів тиску, використовуваних у глобальних моделях прогнозу погоди, на вертикальні рівні WRF.

Після закінчення роботи WPS запускається основний розрахунковий модуль WRF (розташований в \$WRFHOME/WRFV3), результати розрахунків якого зберігаються у форматі NETCDF (файли \$WRFHOME/WRFV3/run/wrfout_d*).

3. Налаштування WRF-Україна для прогнозування опадів у басейнах річок Прут та Сірет

Систему WRF-Україна було налаштовано в рамках українсько-румунського проекту EAST-AVERT для прогнозування опадів у басейнах р. Прут та Сірет. Прогностичні дані WRF-Україна будуть використані у розподілених гідрологічних моделях для прогнозування рівнів води та витрат у цих річках. Моделювання буде проводитись на послідовності трьох вкладених областей. Зовнішня (перша) область розраховується з просторовим дозволом 27 км, друга область – з дозволом 9 км та третя (внутрішня) область – з дозволом 3 км. Внутрішня область покриває басейни р. Прут та Сірет так, що найменша кількість вузлів від границі басейнів до границі області перевищує п'ять. Це зменшує негативний вплив границь області на результати розрахунків.

При налаштуванні WRF-Україна було використано такі параметри програмного модуля WPS:

- кількість вкладених областей – 3;
- крок сітки у кожній з областей: 27, 9 та 3 км відповідно;
- розміри сіток кожної з областей у напрямі із заходу на схід: 75, 46 та 82 вузли відповідно;
- розміри сіток кожної з областей у напрямі із півдня на північ: 75, 37 та 61 вузол відповідно;
- часовий дозвіл вхідних даних глобального прогнозу погоди – 6 годин;
- джерело даних про висоту рельєфу: супутникові дані SRTM [5], які мають горизонтальний просторовий дозвіл приблизно 90 м і були підготовлені для використання в WRF аналогічно тому, як це було зроблено у [6];
- джерело даних про категорії землекористування: супутникові дані MODIS.

У програмному модулі WRF були задані такі основні параметри:

- кількість вкладених областей, горизонтальні просторові дозволи – ті самі, що й у WPS;

- кількість вертикальних рівнів – 28;
- часовий крок інтегрування рівнянь для грубої сітки – 162 с (для вкладених областей крок інтегрування зменшується пропорційно горизонтальному дозволу);

• крок виведення вихідних даних моделі – 1 година.

Фізичні параметризації були задані такими згідно з [1]:

- мікрофізика хмар – схема WRF Double-Moment 6-class scheme;
- довгохвильове випромінення – схема RRTM;
- короткохвильове випромінення – схема Годарда;
- параметризація атмосферного приземного шару – схема моделі Eta;
- параметризація атмосферного граничного шару – схема Мелора-Ямади;
- параметризація купчастої хмарності – схема Кейна Фрітца (окрім 3-ї вкладеної області);
- параметризація діяльного шару ґрунту – схема RUC із 6-ма вертикальними рівнями.

Для функціонування у прогностичному режимі система WRF-Україна була встановлена на 24-процесорному сервері (24 x Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v2 @ 2.60GHz). Усього за умови наявності даних глобальної моделі прогнозу погоди за добу системою

проводиться 2 прогностичних розрахунки з датою початку 0 та 12 година за Гринвічем. У кожному з розрахунків обчислюється прогноз по всій території України на 4 доби (96 годин) вперед.

Після встановлення WRF на сервері БУВР було проведено тестування швидкодії й отримано такі результати стосовно часу розрахунків 1-ї години прогнозу в залежності від кількості ядер: 24 ядра – 52,2 с/1 год.; 16 ядер – 38,8 с/1 год.; 8 ядер – 29,6 с/1 год.; 4 ядра – 43,5 с/1 год.; 1 ядро – 125,7 с/1 год. Як видно з представлених результатів, найменший час розрахунків досягається на 8 ядрах. Далі, завдяки відомому ефекту «насичення», час розрахунків зростає через велику кількість обмінів даними між підобластями.

4. Верифікація метеорологічної моделі для умов катастрофічного паводку 1969 р.

У червні 1969 р. в Українських Карпатах спостерігалися тривалі й інтенсивні дощі, що сформували катастрофічні паводки на ріках басейнів Тиси (верхів'я), Серету, Прута й Дністра [7]. Згідно з інформацією, наявною у роботі [7], найбільш значні дощі-зливи спостерігалися 7–10 червня; місяцями випало опадів більше місячної норми. На території Чернівецької, Івано-Франківської областей за місяць випало від 200 до 400 мм опадів, що становить більш 300% норми.

Паводки завдали великої шкоди народному господарству. Було затоплено багато населених пунктів, значні площі сільськогосподарських угідь і тваринницькі ферми; ушкоджені окремі ділянки залізних і шосейних доріг, мости, свердловини, нафтопроводи, високоевольтні лінії електропередач і підстанції, лінії зв'язку, транспортні засоби, будівельні підприємства тощо.

На деяких ділянках річок червневий паводок перевищив максимальні рівні й витрати води, які спостерігалися за останні 100 років [8]. Аналіз даних спостережень над опадами показав, що внаслідок інтенсивних злив тривалістю 25–40 год. у верхів'ях рік Бистриці Надвірнянської, Бистриці Солотвинської, Лимниці й Прута найбільша (сумарна) кількість опадів дощу складала близько 300 мм.

Формуванню катастрофічного паводку сприяло також високе попереднє зволоження за рахунок опадів, що випали на початку першої декади червня. Максимальні витрати води при найбільш високих рівнях на багатьох річках (Стрий, Ломница, Бистриця, верхів'я Прута й Серету) перевищили найбільші витрати, спостережувані за останні 100 років, і їх повторюваність може відбуватись 1–2 рази за 100 років. У зв'язку з цим великий інтерес для практики, гідрологічних розрахунків і проведення протипаводкових робіт представляє аналіз умов формування паводків у червні 1969 р. і визначення основних характеристик паводків.

Розглянемо синоптичні умови проходження паводку 1969 р згідно з синоптичним оглядом, складеним у 1969 р. начальником Київського бюро погоди З.М. Скоторенком. Період, що передував катастрофічному паводку (з 2 по 6 червня 1969 р.), для західних областей був дуже дощовим і характеризувався виходом на Україну циклонів. Так, у період 2–3 червня кількість опадів у Карпатах досягала 77 мм. Період з 4 по 8 червня характеризувався високим антициклоном із центром над півднем Атлантики, гребінь якого був спрямований на Норвезьке море й Скандинавію. По східній периферії останнього з північними й північно-східними потоками відбувалося вторгнення холоду через Німеччину, Францію на захід Середземного моря. Адвекція холоду на висоті супроводжувалася активним циклогенезом, у результаті чого 5 червня, а біля поверхні Землі – 4 червня в районі Італії виник циклон, який до 7 червня досяг Румунії й заповнився внаслідок співпадіння з областю холоду. В улоговині старого циклону, на заході Румунії, вночі 8-го червня (03 год.) виник новий глибокий циклон, який характеризувався великою водністю, оскільки утворення циклону відбулося у повітряній масі, що змістилася з басейну Середземного моря.



19690608:18 hrs

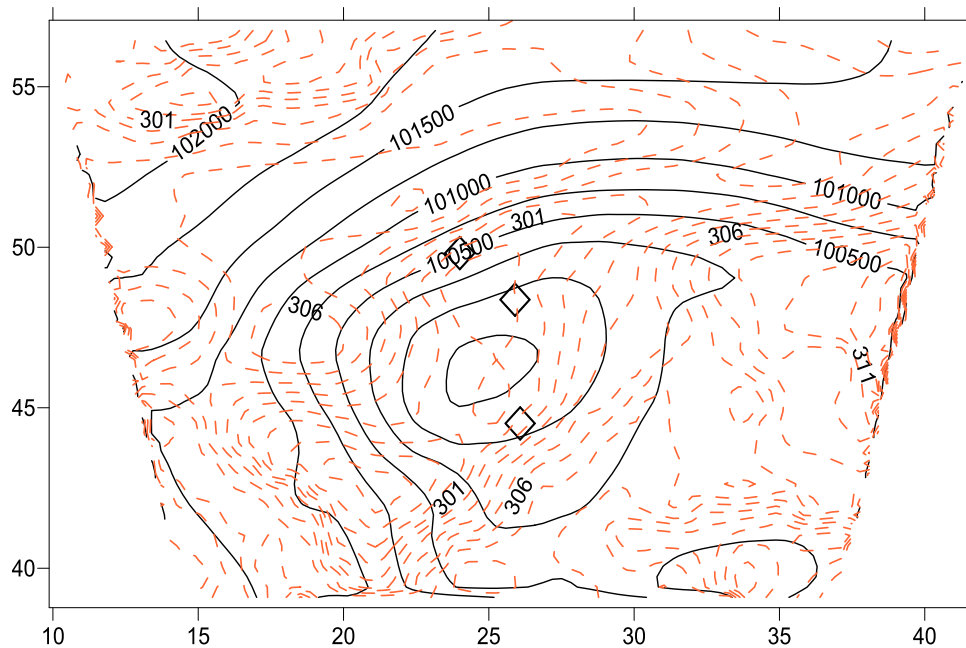


Рис. 2. Карты тиску на рівні моря 8 червня о 18 год., побудовані черговим синоптиком ГМС УРСР (зверху) та на підставі даних реаналізу ERA-40 Європейського центру середньострокового прогнозування ECMWF (знизу). На карті знизу штриховими лініями показано потенційну температуру на рівні 850 мб. Ромбами позначені Львів, Чернівці та Бухарест

Крім цього, у результаті рясних дощів, що раніше випали на півночі Карпат, над Угорською низовиною й Німеччиною, перебувала область вологого повітря. Тому дефіци-

ти точки роси в області циклону до висоти 3–5 км становили 0–2 градуси, а питома вологість дорівнювала 6–9 г/кг.

Паралельно арктичному фронту над південно-заходом Чорного моря й заходом Туреччини проходив полярно-фронтний сектор; о 18 год. 07.06 на ньому північніше Стамбула виник циклон і до 6 год. 08.06 він перемістився на Одеську область, а потім увійшов у систему основного циклону, який до цього часу перемістився на південь Карпат і поглибився (рис. 2). Таким чином, за рахунок циклогенезу над заходом Чорного моря центр циклону тривалий час перебував над центральними й південними районами Карпат, і тільки до 6 год. 10.06 він перемістився на захід Одеської області й заповнився. На висоті циклон за 2 доби – 3 год. 08.06 до 3 год. 10.06 переміщався надзвичайно повільно. Тому вітри на висоті й коло поверхні Землі протягом цього періоду залишалися південно-східні й східні. Район Карпат перебував увесь час у «голові» циклону й активного теплового фронту. Поперед теплового фронту спостерігалися інтенсивні обложні дощі; особливо сильні дощі пройшли в районі Карпат і в західних областях України.

Для моделювання метеорологічних умов, що супроводжували паводок, були використані дані реаналізу ERA-40 Європейського центру середньострокового прогнозування ECMWF. На рис. 2 показано порівняння карт тиску на рівні моря 08 червня, 18 год., побудованих черговим синоптиком ГМС УРСР у період паводку та на підставі даних ERA-40. З рисунків видно, що дані реаналізу описують основні особливості полів тиску в області, у тому числі вторинний циклон над Туреччиною, який з часом увійшов у систему основного циклону. З ізоліній потенційної температури на рівні 850 мб, згідно з даними ERA-40, представленими на рисунку, видно, як теплий фронт проходить через район Карпат, що приводить до виникнення катастрофічних опадів.

На рис. 3 представлено порівняння розрахованих WRF-Україна сум опадів за 7–10 червня 1969 р. із даними вимірювань, опублікованими у роботі [7]. Зазначимо, що мережа вимірювань, представлена у роботі [7] та на рис. 3, здається густішою за мережу регулярних вимірювань, що проводяться Укргідрометцентром. Можливо, додаткові вимірювання були здійснені на експериментальних водозборах, які в ті часи функціонували в Карпатах. На підставі тільки виключно регулярних даних вимірювань було б неможливо відтворити достатньо складну структуру поля опадів, показану на рис. 3. Зазначимо, що аналогічна ситуація мала місце у випадку опадів, які спричинили катастрофічні паводки у Карпатах у липні 2008 р. [2]. Як видно з рис. 3, WRF здатна відтворити поле опадів за період катастрофічного паводку з урахуванням його підсилення за рахунок орографічного впливу гір. Але досягти такого результату було можливо тільки при достатньо великому розмірі дрібномасштабної розрахункової сітки, яка, на відміну від сітки, що використовується в оперативних розрахунках, у даному випадку охоплювала увесь регіон українських Карпат.

При оперативному застосуванні WRF-Україна розмір внутрішньої розрахункової області обмежений умовами проведення розрахунків у реальному часі. У попередньому розділі було вказано, що час розрахунку 96 год. прогнозу у конфігурації, запропонованій для оперативного застосування, становив 45 хв. При цьому розмір внутрішньої розрахункової області у широтному та меридіональному напрямках складав відповідно 240x180 км. Будемо вважати, що умови застосування розрахунків у реальному часі не будуть порушуватись, якщо розрахунок 96 год. метеопрогнозу триватиме 2,5–3 години, що у 3,3 рази більше зазначеного вище часу розрахунків при попередній конфігурації. Отже, розмір області в обох горизонтальних напрямках можливо збільшити у $\sqrt{3,3} = 1,8$ рази, і тоді він складатиме 432x324 км. Остаточне рішення стосовно використання модифікованих параметрів внутрішньої розрахункової області буде прийнято пізніше в залежності від завантаження кластера при його регулярному використанні.

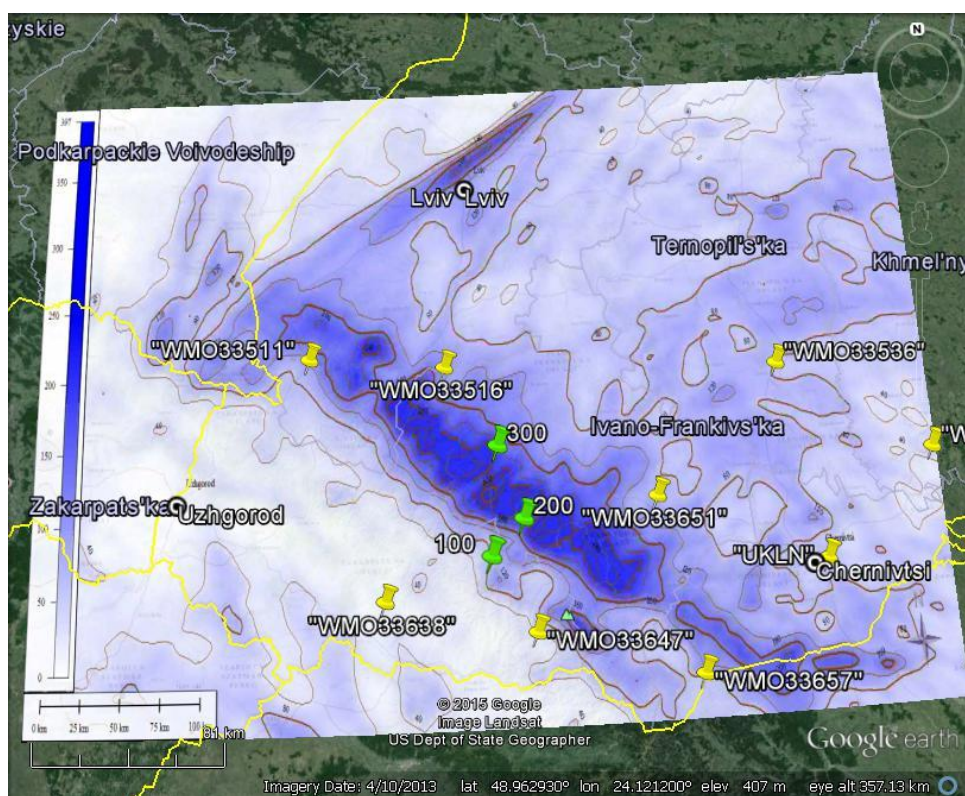
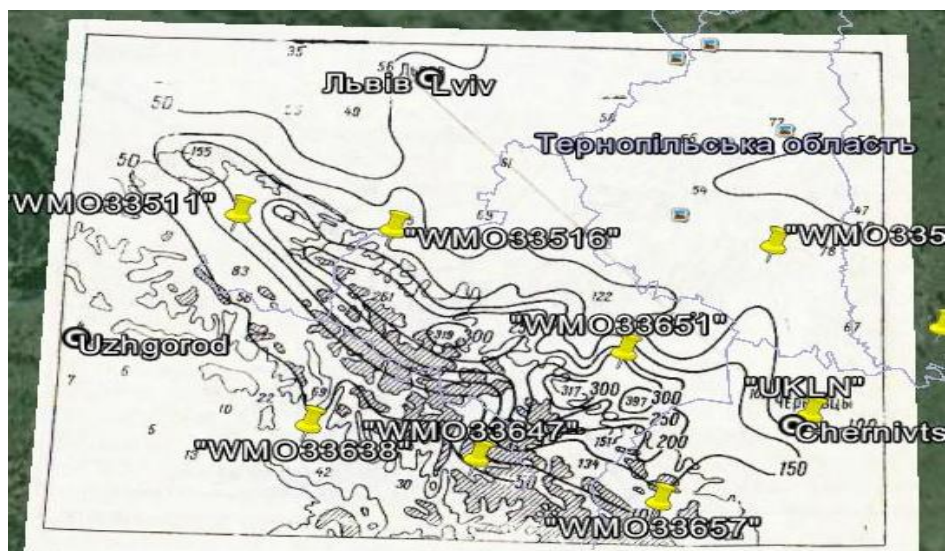


Рис. 3. Порівняння розрахованих полів опадів з 7 по 10 червня 1969 р. (знизу) та даних вимірювань з роботи [7] (зверху). На рисунку знизу позначено ізолінії із значеннями 100, 200 та 300 мм

5. Висновки

У роботі представлено результати налаштування системи оперативного метеорологічного прогнозування WRF-Україна для забезпечення систем попередження про паводки в українських частинах басейнів річок Прут та Сірет прогностичними полями опадів, розрахованих на детальній сітці, що дозволяє урахувати орографічний вплив місцевості (Карпати) на виникнення опадів. Представлено також результати верифікації моделей, що використовуються на підставі даних вимірювань, зібраних під час одного з найбільш катастрофічних паводків, що відбулися у даному регіоні протягом останніх 100 років, який стався у червні 1969 р. Для моделювання метеорологічних умов, що супроводжували паводок, були вико-

ристані дані реаналізу ERA-40 Європейського центру середньострокового прогнозування ECMWF, які описують основні особливості полів тиску в області, у тому числі вторинний циклон над Туреччиною, що з часом увійшов у систему основного циклону. Як показано у роботі, модель здатна відтворити поле опадів за період катастрофічного паводку з урахуванням його підсилення за рахунок орографічного впливу гір. Досягти такого результату було можливо тільки при достатньо дрібному масштабі розрахункової сітки (просторовий дозвіл – 3 км). Результати адаптації та верифікації WRF-Україна свідчать про те, що ця система здатна прогнозувати виникнення екстремальних опадів у басейнах р. Прут та Сірет з урахуванням ефектів орографічного підсилення опадів.

ПОДЯКИ

Автори вдячні Т.М. Негадайловій, директору Черновицького обласного центру з гідрометеорології ДСНС України та Довгичу М.І., начальнику ГДА Центральної геофізичної обсерваторії за надану інформацію стосовно паводку 1969 р.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. A description of the advanced research WRF version 3. [Електронний ресурс] / W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia [et al.] // NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. – USA, Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2008. – 125 p. – Режим доступу: <http://wrf-model.org>.
2. Моделювання катастрофічного паводку в карпатському регіоні у липні 2008 р. каскадом метеорологічних та гідрологічних моделей / О.В. Бойко, І.В. Ковалець, М.Й. Железняк [та ін.] // IV наук.-практ. конф. з міжнар. участю “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС’2009”: тези доп., (Київ, 22–26 червня 2009 р.). – Київ, 2009. – С. 21 – 24.
3. Удовенко О.И. Расчет осадков в период катастрофического паводка 21–27 июля 2008 года в Украинских Карпатах / О.И. Удовенко, И.В. Ковалец // Український гідрометеорологічний журнал. – 2015. – № 16 [у редакції].
4. Rutledge G. NOMADS – a climate and weather model archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration / G. Rutledge, J. Alpert, W. Ebusizaki // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2006. – Vol. 87. – P. 327 – 341.
5. An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639 / E. Rodriguez, C.S. Morris, J.E. Belz [et al.] // Jet Propulsion Laboratory. – Pasadena, California, 2005. – 143 p.
6. Халченков А.В. Адаптация метеорологической модели WRF для прогнозирования полей ветра вокруг Ривненской АЭС / А.В. Халченков, И.В. Ковалец // Математичні машини та системи. – 2015. – № 1. – С. 130 – 137.
7. Сильные дожди и наводнения в украинских Карпатах и над Предкарпатьем 7–9 июня 1969 г. / А.И. Ромов, Л.Ф. Богатырь, Л.З. Прох [и др.] // Сб. тр. УкрНИГМИ. – 1970. – Т. 96. – С. 3 – 25.
8. Условия формирования и прохождения катастрофических паводков на реках Карпат в июне 1969 г. [технический отчет] / Под ред. П.М. Лютика, Б.М. Штейнгольца. – К.: Управление гидрометеорологической службы Украинской ССР, 1970.

Стаття надійшла до редакції 01.07.2015