

УДК 528.9

І.В. КОВАЛЕЦЬ*, О.В. ХАЛЧЕНКОВ*, О.О. ПОЛОНСЬКИЙ*

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ WRF-УКРАЇНА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ АГРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. Систему метеопрогнозу WRF-Україна налаштовано для прогнозування в Україні на детальних сітках як стандартних метеорологічних параметрів, так і агрометеорологічних характеристик, таких, як температура та вологість ґрунту. Модель верифіковано на підставі даних вимірів українських та австрійських метеорологічних та агрометеорологічних станцій. Температура повітря, швидкість і напрям вітру, а також температура ґрунту прогноуються на рівні краіх світових аналогів. Середньоквадратична похибка прогнозування температури ґрунту на глибині 10 см на основі порівняння з даними українських станцій за весняно-літній період 2018 р. (декадні середні) складає 1,7°C (для прогнозів із завчасністю до 48 год) та 1,9°C (для прогнозів із завчасністю 48–96 год). Коефіцієнт кореляції складає 0,92. Середньоквадратична похибка прогнозування температури ґрунту на глибині 20 см на основі порівняння з даними щогодинних вимірів австрійських станцій за той самий період складає 2,2 С, коефіцієнт кореляції дорівнює 0,87. Результати прогнозування загального запасу вологи у ґрунті у шарі 0–20 см виявились завищеними у порівнянні з даними українських станцій на 30%. У порівнянні з австрійськими станціями навпаки: результати прогнозування відносної вологості ґрунту на глибині 20 см були заниженими на 20 %. Коефіцієнти кореляції склали відповідно 0,55 та 0,3. Такі похибки пояснюються похибками у прогнозуванні опадів та сильною залежністю вологості ґрунту від локальних географічних умов (ухили площадок тощо), які не можуть бути відтворені при встановленому просторовому дозволі моделі (від 0,05 до 0,1 град). Однією з можливостей покращення прогнозування вологості ґрунту у майбутньому буде підключення автономної версії ґрунтової моделі до системи, її налаштування під локальні умови розташування кожної ділянки і виконання розрахунків із використанням метеорологічних параметрів, прогнозованих системою WRF-Україна.

Ключові слова: метеорологічний прогноз, температура ґрунту, мезомасштабна модель.

Аннотація. Система метеопрогноза WRF-Україна настроєна для прогнозування в Україні на детальних сітках стандартних метеорологічних параметрів і агрометеорологічних характеристик, таких, як температура і вологість ґрунту. Модель верифікована на основі даних вимірів українських і австрійських метеорологічних і агрометеорологічних станцій. Температура повітря, швидкість і напрям вітру, а також температура ґрунту прогноуються на рівні краіх світових аналогів. Середньоквадратична похибка прогнозів температури ґрунту на глибині 10 см на основі порівняння з даними українських станцій за весняно-літній період 2018 г. (декадні середні) складає 1,7°C (для прогнозів із завчасністю до 48 ч) і 1,9°C (для прогнозів із завчасністю 48–96 ч). Коефіцієнт кореляції складає 0,92. Середньоквадратична похибка прогнозів температури ґрунту на глибині 20 см на основі порівняння з даними щогодинних вимірів австрійських станцій за той самий період складає 2,2°C, коефіцієнт кореляції дорівнює 0,87. Результати прогнозування сумарного запасу вологи у ґрунті у шарі 0–20 см виявились завищеними по порівнянню з даними українських станцій на 30%. Для австрійських станцій результати прогнозування відносної вологості ґрунту на глибині 20 см були заниженими на 20%. Коефіцієнти кореляції склали 0,55 і 0,3. Такі похибки пояснюються похибками в прогнозуванні опадів і сильною залежністю вологості ґрунту від локальних географічних умов (ухили площадок і т.д.), які не можуть бути відтворені при встановленому просторовому дозволі моделі (від 0,05 до 0,1 град). Однією з можливостей покращення прогнозування вологості ґрунту в майбутньому буде підключення автономної версії ґрунтової моделі до системи, її налаштування під локальні умови розташування кожної ділянки і виконання розрахунків із використанням метеорологічних параметрів, прогнозованих системою WRF-Україна.

ние автономной версии почвенной модели к системе, ее настройка под локальные условия расположения каждого участка и выполнение расчетов с использованием метеорологических параметров, прогнозируемых системой WRF-Украина.

Ключевые слова: метеорологический прогноз, температура почвы, мезомасштабная модель.

Abstract. Weather forecasting system WRF-Ukraine is configured for prediction in Ukraine on detailed grids of both standard meteorological parameters and agrometeorological characteristics such as soil temperature and moisture. The model is verified on the basis of measurement data of Ukrainian and Austrian meteorological and agrometeorological stations. The air temperature, wind speed and direction, as well as soil temperature are forecasted with the skill similar to best existing analogues. The root mean square error of soil temperature forecasts at 10 cm depth, based on a comparison with the data of Ukrainian stations during the spring-summer period of 2018 (decade averages), is 1,7°C (for predictions with a lead time up to 48 hours) and 1,9°C (for predictions with a lead time of 48–96 hours). The correlation coefficient is 0,92. The root mean square error of the soil temperature forecasts at a depth of 20 cm, based on comparison with the hourly data of the Austrian stations is 2,2°C, the correlation coefficient is 0,87. The predicted soil moisture in the 0–20 cm layer was overestimated by 30% as compared to the data of Ukrainian stations. In comparison with the Austrian stations the results of 20 cm deep moisture prediction were understated by 20%. Correlation coefficients were 0,55 and 0,3. Such errors are due to errors in forecasting precipitation and the strong dependence of soil moisture on local geographic conditions (site slopes, etc.) that cannot be reproduced under the spatial resolution of the model (from 0,05 to 0,15 deg). One of the possibilities to improve prediction of soil moisture in the future will be the connection of the stand-alone version of the soil model to the system, its adjustment to the local conditions of each site, and performing calculations with such stand-alone soil model using the meteorological parameters predicted by the WRF-Ukraine system.

Keywords: meteorological forecast, soil temperature, mesoscale model.

1. Вступ

У світі системи метеорологічного прогнозування використовуються для планування сільськогосподарських робіт. Окрім стандартних метеорологічних параметрів, специфічними параметрами, які необхідно прогнозувати, є температура та вологість ґрунту. Прогнозування таких параметрів з урахуванням взаємодії діючого шару ґрунту з нижнім шаром атмосфери вимагає використання спеціальних підмоделей взаємодії поверхні, рослинності, атмосфери та моделей ґрунту у складі моделей прогнозу погоди. В ІПММС НАН України понад 20 років проводяться дослідження у галузі впровадження метеорологічних моделей для прогнозування погоди та регіональних кліматичних досліджень. На підставі американської метеорологічної моделі WRF (www.wrf-model.org) була розроблена система WRF-Україна [1], яка в даний час впроваджена в Укргідрометцентрі для метеорологічного забезпечення системи РОДОС [2] та для прогнозування паводків у Карпатах [1]. Крім використання в Україні, система WRF-Україна користується попитом у світі. Зокрема, у рамках проекту NERIS-TP 7-ї рамкової програми ЄС дана система інтегрована з системою РОДОС для проведення оперативного розрахунку метеопрогнозу за замовленням користувача у довільній області і була використана під час аварії на АЕС Фукусіма [3, 4]. У роботі представлена поточна конфігурація WRF-Україна, яка встановлена в Українському гідрометцентрі для забезпечення системи РОДОС-Україна [5] даними чисельного прогнозу погоди.

Метою роботи є дослідження якості метеорологічного прогнозування поточної конфігурації системи WRF-Україна, зокрема, температури та вологості ґрунту.

2. Конфігурація системи WRF-Україна

Архітектура системи WRF-Україна представлена у роботі [1], а детальні блок-схеми розрахунку – у роботі [6]. Розрахунок здійснюється на основі прогностичних даних американ-

ської глобальної моделі прогнозу погоди GFS, які наявні з просторовим дозволом $0,25^\circ$ на серверах NOMADS [7].

Для прогнозування мезомасштабних деталей метеорологічних умов необхідно проводити розрахунки деталізованих метеорологічних полів з високим дозволом. При цьому необхідно зберігати досить великими горизонтальні обсяги обчислювальних областей, які не бажано робити меншими, ніж 500 км. Це потрібно для того, щоб похибки, які вносяться граничними умовами, не руйнували характерні мезомасштабні циркуляції, пов'язані з проходженням фронтів, тощо. Обчислювальних можливостей, доступних авторам даної роботи не вистачає для покриття усієї території України сіткою з просторовим дозволом хоча б $0,05$ град. Після проведення ряду обчислювальних експериментів для оперативного розрахунку була обрана конфігурація обчислювальних областей, показана на рис. 1. Модель проводить розрахунки у трьох областях. Зовнішня область – D01 охоплює значну територію, включаючи Україну, з просторовим дозволом $0,15$ град. (приблизно 15 км по довготі). Дві внутрішні області – D02 та D03 охоплюють північно-західну та південно-східну частини території України з просторовим дозволом $0,05$ град. (приблизно 5 км по довготі). Разом області D02, D03 покривають приблизно половину території України сітками з детальним просторовим дозволом та включають такі міста, як Київ, Львів, Дніпро, Запоріжжя та ін. На рис. 1 показані також карти типів ґрунтів, сформовані Геологічною службою США на основі глобального набору даних, зібраних Продовольчою організацією ООН [8]. Для території України цей набір характеризується просторовим дозволом 5 хв.

У поточній конфігурації використовувались такі налаштування фізичних параметризацій моделі WRF.

- Параметризація мікрофізики хмароутворення у вкладених областях D02, D03; бралась WSM6 [9] (mp_physics=6), в якій розглядається 6 типів вологи у повітрі: пара, дощові краплі, сніг, хмарні краплі, хмарна крига, частинки граду.

- Параметризація мікрофізики хмароутворення у зовнішній області D01, було взято схему WDM6 [9] (mp_physics=16), яка є двохмоментною модифікацією схеми WSM6.

- Параметризація купчастої хмарності Кейна-Фрітча у зовнішній області D01 (cu_physics=1), тоді як у вкладених областях D02, D03 параметризація купчастої хмарності не використовується.

- Параметризація довгохвилевої радіації RRTM [9] (ra_lw_physics=1).

- Параметризація короткохвилевої радіації Годарда (ra_sw_physics=2) [9].

- Параметризація планетарного граничного шару атмосфери Мелора-Ямади-Янжича (bl_pbl_physics=2).

- Параметризація моделі Ета для взаємодії приземного шару атмосфери та верхнього шару ґрунту (sf_sfclay_physics=2).

- Параметризація RUC для діючого шару ґрунту (sf_surface_physics=3), з 6-ма розрахунковими шарами у ґрунті.

У поточній конфігурації розрахунок одного прогнозу на 96 діб у паралельному режимі з залученням 32 обчислювальних ядер тактовою частотою 2,1 GHz триває 3 години.

3. Порівняння результатів прогнозування з метеорологічними вимірами

Верифікацію результатів прогнозування стандартних метеорологічних параметрів було проведено на основі порівняння з архівними даними метеостанцій Укргідрометцентру за лютий–червень 2015 р. У табл. 1 наведені середні абсолютні похибки (MAE) швидкості та напрямку вітру, а також систематичні (ME) та середньоквадратичні похибки (MSE) для різних станцій. Слід відзначити, що значення похибки прогнозування напрямку та швидкості вітру знаходяться на рівні похибок сучасних моделей прогнозу погоди [10].

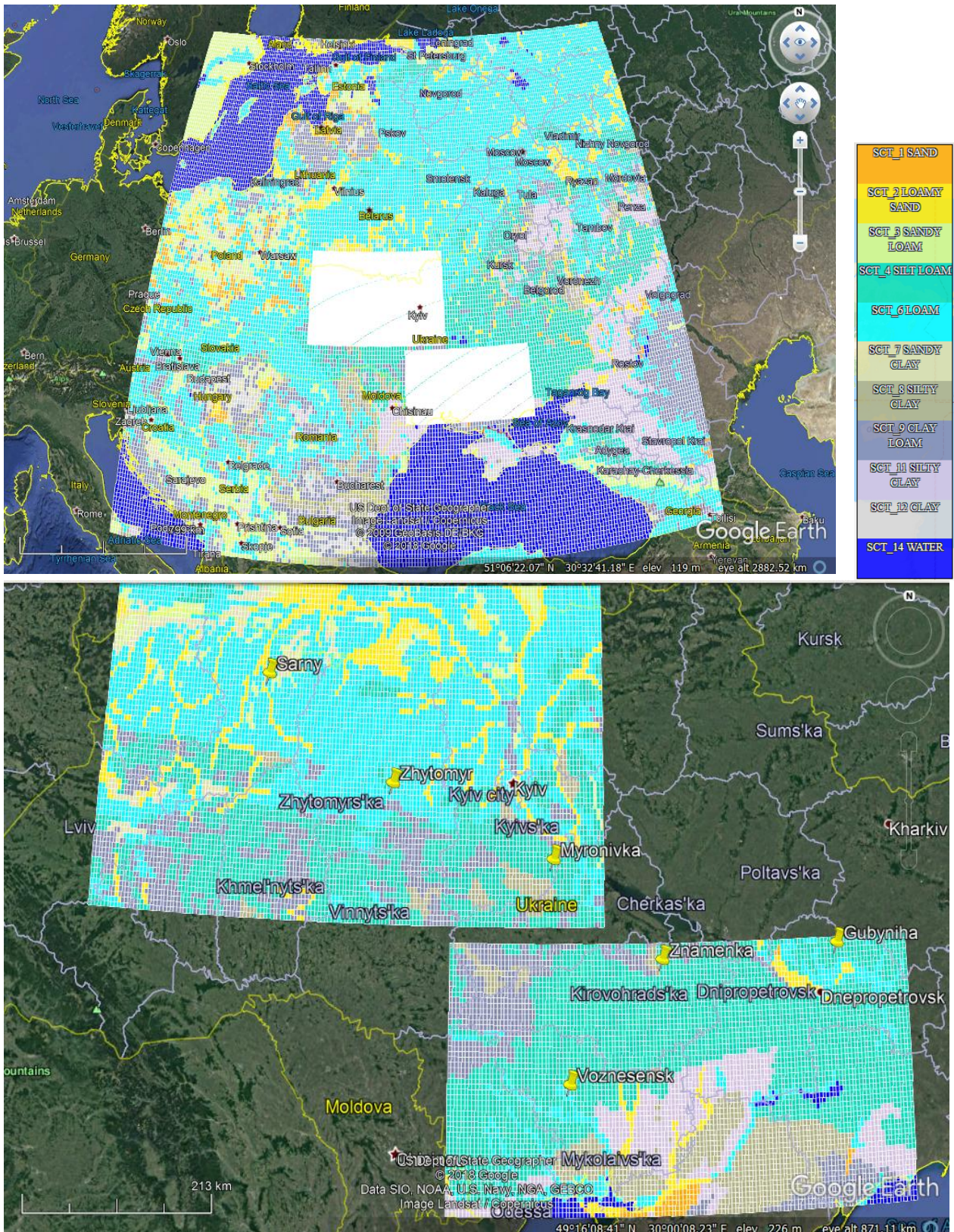


Рисунок 1 – Конфігурація обчислювальних областей WRF-Україна та карти типів ґрунту; зверху – зовнішня область D01; знизу – вкладені області D02, D03

Таблиця 1 – Статистичні характеристики похибки прогнозування WRF-Україна у порівнянні з даними метеорологічних станцій

Станція	Код станції	Швидкість вітру, м/с	Напрямок вітру, град.	Температура, °C	
		MAE	MAE	ME	MSE
Умань	WMO33587	1,65	26,08	-0,42	1,67
Дніпро	WMO34504	1,01	23,99	-0,03	1,98
Кіровоград	UKKG	0,79	22,50	-0,19	2,10
Дніпро-аеропорт	UKDD	0,37	25,59	-0,34	2,90
Кривий Ріг	UKDR	0,82	34,51	-0,15	2,79
Запоріжжя	UKDE	1,03	29,48	0,22	2,55
Любашівка	WMO33761	1,57	32,46	0,14	1,55
Миколаїв	UKON	1,00	29,47	-0,01	1,59
Херсон	UKOH	0,87	25,23	0,13	2,19
Півд.-Укр. АЕС	UAES	1,28	23,61	0,68	1,77

4. Верифікація результатів прогнозування температури та вологості ґрунту

Верифікація результатів прогнозування температури та вологості ґрунту проводилась на підставі даних вимірів таких станцій.

- Станції Українського гідрометцентру (УГМЦ), які були надані авторам, а саме, станції «Сарни», «Житомир», «Миронівка», «Знаменка», «Вознесінськ», «Губиниха» (надалі – «українські станції»).
- Станції австрійської мережі WEGENERNET [11] (<https://wegenernet.org/portal/>), які були отримані з міжнародної бази даних моніторингу вологості ґрунту (ISMN) [12, 13] (надалі – «австрійські станції»).

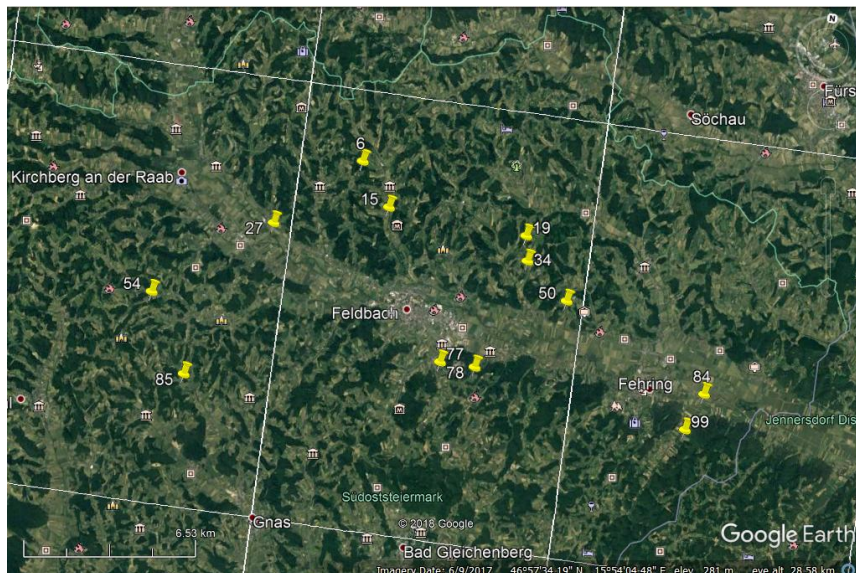


Рисунок 2 – Розміщення австрійських станцій, з якими проводилось порівняння моделі, та комірки розрахункової сітки WRF, в які попадають станції

Розміщення українських станцій на карті показано на рис. 1. Карта розміщення австрійських станцій у збільшеному масштабі показана на рис. 2.

Від українських станцій було отримано такі дані.

- Декадні середні температури ґрунту на глибині 10 см з квітня по серпень 2018 р;

• Декадні загального запасу вологи ґрунту (мм) у шарі 0-20 см з квітня по серпень 2018 р.

Модель WRF розраховує температуру ґрунту та відносну вологість ґрунту у шарах 0-10 та 10-30 см. Відповідно для порівняння результатів моделювання з даними вимірів температура та вологість ґрунту, розраховані WRF, були проінтерпольовані таким чином:

$$t_{10} = 0,5(t_{0-10} + t_{10-30}),$$
$$q_{0-20} = 0,5(q_{0-10} + q_{10-30}).$$

Тут t_{10} – температура ґрунту у °С на глибині 10 см, t_{0-10} – середня температура шару ґрунту 0–10 см, t_{10-30} – середня температура шару ґрунту 10-30 см. Аналогічні визначення застосовуються для відносної вологості q . Для отримання запасу вологи Q_{0-20} (мм) у шарі 0–20 см відносну вологість треба помножити на товщину шару ґрунту та на густину води: $Q_{0-20} = 0,2 \cdot 1000 \cdot q_{0-20}$.

Окрім вертикальної інтерполяції, для порівняння з даними вимірів українських станцій, результати WRF треба проінтерпольовати та осереднити за часом. Слід зазначити, що згідно з настановою [14], середні декадні температури ґрунту за даними вимірів отримуються шляхом осереднення даних вимірів, отриманих кожен день о 16 год. Результати WRF розраховуються з часовим кроком 1 год. Відповідно осереднення температур ґрунту, розрахованих WRF, здійснювалось за такою формулою: $t_{10} = (1/10) \sum_{i=1}^{10} t_{10}^i$, де t_{10}^i – температура ґрунту на глибині 10 см за результатами розрахунків на 16-ту годину i -го дня відповідної декади.

Згідно з настановою [14], вологість ґрунту вимірюється на 8-й день декади, або, в окремих випадках, на 9-й день. Разом з вимірами вологості були отримані точні дати вимірів та обрані відповідні результати розрахунків WRF для порівняння.

Від австрійських станцій було отримано такі дані: температура та відносна вологість ґрунту на глибині 20 см за результатом щогодинних вимірів з квітня по вересень 2018 р. Ці дані були співставлені з результатами розрахованих WRF температури та вологості у шарі 10–30 см.

Результати співставлення розрахованих WRF температури ґрунту з завчасністю до 48 год та відповідних даних вимірів українських станцій представлені на рис. 3. Як видно з представлених на рис. 3 результатів, температура ґрунту прогнозується з високою точністю. Це підтверджується і статистичними характеристиками похибок, представленими у табл. 2.

Температура ґрунту прогнозується з високою точністю (середньоквадратичне відхилення 1,7°C, коефіцієнт кореляції 0,92), що є на рівні найкращих сучасних метеорологічних моделей [15]. Щоправда, похибки, представлені у роботі [15], отримані на підставі даних вимірів температури за кожен годину, тоді як від українських станцій доступні тільки декадні середні. Тобто, похибка осереднених значень температури має бути менше від похибки щогодинних значень. У табл. 2 представлені також характеристики похибки прогнозу температури ґрунту з завчасністю 48-96 год, які не дуже відрізняються від аналогічних характеристик прогнозу з завчасністю 0-48 год.

На відміну від українських станцій, дані австрійських станцій доступні за кожен годину. Не зважаючи на велику різницю у часовому дозволі австрійських вимірів у порівнянні з українськими, похибка прогнозування температури ґрунту у порівнянні з австрійськими станціями теж непогана: середньоквадратичне відхилення 2,2°C, коефіцієнт кореляції 0,87. Отже, висновок про можливість якісного прогнозу температури ґрунту є достатньо обґрунтованим.

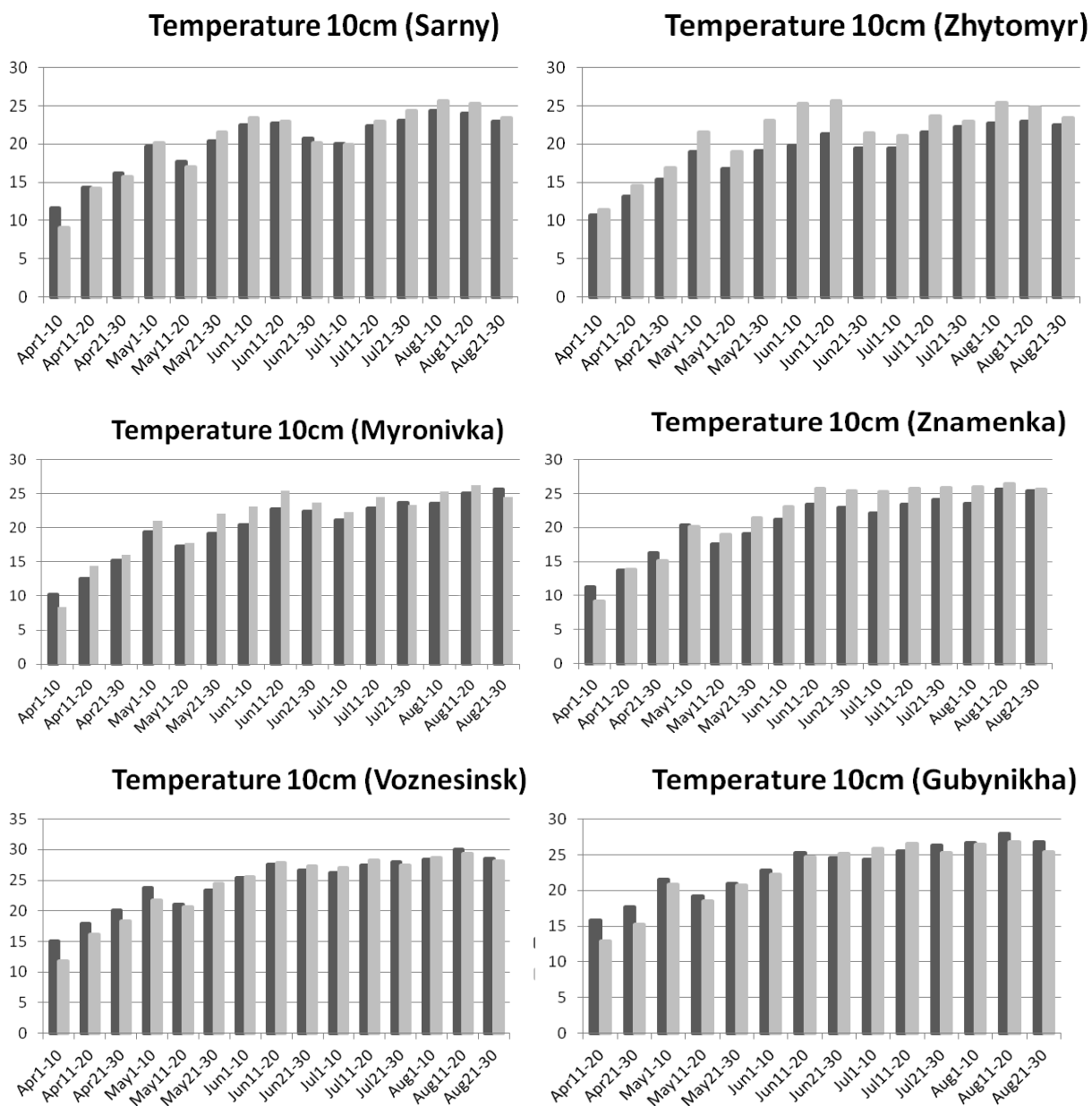


Рисунок 3 – Співставлення вимірів українських станцій (світло-сірим) та результатів прогнозування (темно-сірим) середньої декадної температури ґрунту на глибині 10 см

На відміну від температури ґрунту, вологість ґрунту прогнозується значно гірше. Представлені у табл. 3 коефіцієнти кореляції розрахованих значень та вимірів (0,55 для українських станцій, 0,28 – для австрійських станцій) значно менше відповідних значень, отриманих для температури ґрунту. До того ж, у порівнянні з українськими станціями вологість ґрунту за даними розрахунків перевищується майже на 30%, тоді як у порівнянні з австрійськими станціями навпаки, вологість ґрунту в середньому менше, ніж значення вимірів, на 25%. Найбільш імовірно, систематичні похибки вологості ґрунту в обох випадках пояснюються відповідними похибками прогнозування опадів.

Як для українських, так і для австрійських станцій, середньоквадратична похибка прогнозування вологості, як і систематична похибка, складає приблизно 25–30% від середнього значення вологості ґрунту. Отже, на відміну від температури, середньоквадратична похибка спричиняється в першу чергу систематичною похибкою вологості ґрунту.

Таблиця 2 – Статистичні характеристики похибки прогнозування температури ґрунту

Джерело даних	Завчасність прогнозу	RMSE, °C	ME, °C	Коефіцієнт кореляції
Українські станції	0-48	1,7	-0,6	0,93
Українські станції	48-96	1,9	-1,25	0,94
Австрійські станції	0-48	2,24	-1,09	0,87

Таблиця 3 – Статистичні характеристики похибки прогнозування вологості ґрунту з завчасністю 0-48 год у порівнянні з даними українських станцій

Джерело даних	Середнє за вимірами	Параметр, [одиниці вимір.]	RMSE	ME	Коефіцієнт кореляції
Українські станції	38	Запас вологи у шарі 20 см, [мм]	15	11	0,55
Австрійські станції	0,39	Відносна вологість [безрозм.]	0,1	-0,09	0,28

Слід зазначити, що подібні до приведених у даній роботі рівні похибки прогнозування вологості зустрічаються і в інших роботах, наприклад, в [16]. Але одночасно існують роботи з кращим рівнем прогнозування вологості. Наприклад, у роботі [17] отримані значення коефіцієнта кореляції 0,8. Таким чином, якість прогнозування вологості ґрунту ймовірно може бути покращена у подальших дослідженнях за рахунок: 1) підбору фізичних параметризацій; 2) використання уточнених географічних даних (карти ґрунтів тощо); 3) використання більш сучасних методів ініціалізації характеристик ґрунту, наприклад, з використанням супутникових вимірів.

У табл. 4 та 5 представлені похибки прогнозування температури та вологості ґрунту, отримані для окремих австрійських станцій. Австрійські станції розміщені дуже близько одна від одної (рис. 2) і попадають тільки у три комірки WRF (показані на тому ж рисунку). Отже, відмінність похибок прогнозування для окремих станцій характеризує у значній мірі відмінність даних різних станцій між собою.

Для випадку температури ґрунту у значній мірі (від $-2,1$ °C до $0,08$ °C) відрізняються систематичні похибки температури. Приблизно таким самим діапазоном (від $1,5$ до $3,4$ °C) характеризуються середньоквадратичні похибки температури ґрунту. Зазначимо, що діапазон коливань систематичної та середньоквадратичної похибок між станціями (≈ 2 °C) приблизно співпадає з самою середньоквадратичною похибкою прогнозування. Одночасно коефіцієнти кореляції, отримані для різних станцій, майже однакові (від $0,89$ до $0,92$).

Майже протилежна ситуація спостерігається для вологості. Систематичні та середньоквадратичні похибки практично однакові для усіх станцій, тоді як коефіцієнти кореляції змінюються у дуже широкому діапазоні: від $-0,2$ до $0,53$.

Така різниця результатів прогнозування вологості між різними станціями пояснюється великою чутливістю вологості до місцевих умов, таких, як кут нахилу майданчика та інші, які не враховуються на грубій сітці метеорологічної моделі. Найбільш імовірно поліпшення результатів прогнозування вологості можна досягти шляхом підключення окремої моделі ґрунту, налаштованої для умов конкретної земельної ділянки, з урахуванням кута нахилу, конкретних властивостей ґрунту тощо.

Таблиця 4 – Статистичні характеристики похибки прогнозування температури ґрунту на глибині з завчасністю 0–48 год у порівнянні з даними австрійських станцій

Станція	ME, С	RMSE, С	Коефіцієнт кореляції
6	-2,1	2,5	0,92
15	-1,8	2,5	0,89
19	-0,05	1,6	0,91
27	-1,1	2,1	0,88
34	-2,8	3,2	0,92
50	-2,8	3,4	0,9
54	0,3	1,8	0,9
77	-1,0	1,8	0,91
78	-0,07	1,5	0,91
84	-1,3	2,1	0,89
85	-0,5	1,7	0,9
99	0,08	1,7	0,9

Таблиця 5 – Статистичні характеристики похибки прогнозування вологості ґрунту на глибині з завчасністю 0–48 год у порівнянні з даними австрійських станцій; <Fo> – середнє значення вологості за період вимірів

Станція	ME	RMSE	<Fo>	Коефіцієнт кореляції
6	-0,12	0,13	0,42	0,29
15	-0,14	0,14	0,44	-0,2
19	-0,08	0,1	0,37	0,15
27	-0,1	0,11	0,39	0,45
34	-0,07	0,09	0,37	0,34
50	-0,11	0,12	0,41	0,53
54	-0,1	0,1	0,39	0,5
77	-0,1	0,11	0,39	0,45
78	-0,06	0,08	0,36	0,49
84	-0,04	0,07	0,34	0,48
85	-0,12	0,13	0,41	-0,08
99	-0,11	0,12	0,4	0,1

На рис. 4 показано порівняння результатів моделювання температури ґрунту і вимірів обраних станцій. Серед усіх австрійських станцій було обрано по одній у кожній з трьох розрахункових комірок WRF, в які попадають усі австрійські станції. Для кожної комірки обрано було саме ту станцію, для якої систематична похибка була найменшою серед усіх інших станцій, які попадають у ту саму комірку.

Як видно з рис. 4, прогнозована температура ґрунту і виміри дуже добре співпадають для обраних станцій. Розрахована температура характеризується більшою амплітудою добового ходу, ніж виміри. Це, скоріш за все, пов'язано з заниженням вологості ґрунту у моделі. Як видно з рис. 4, переважно саме різниця амплітуди коливань температури при добовому ході створює середньоквадратичну похибку температури.

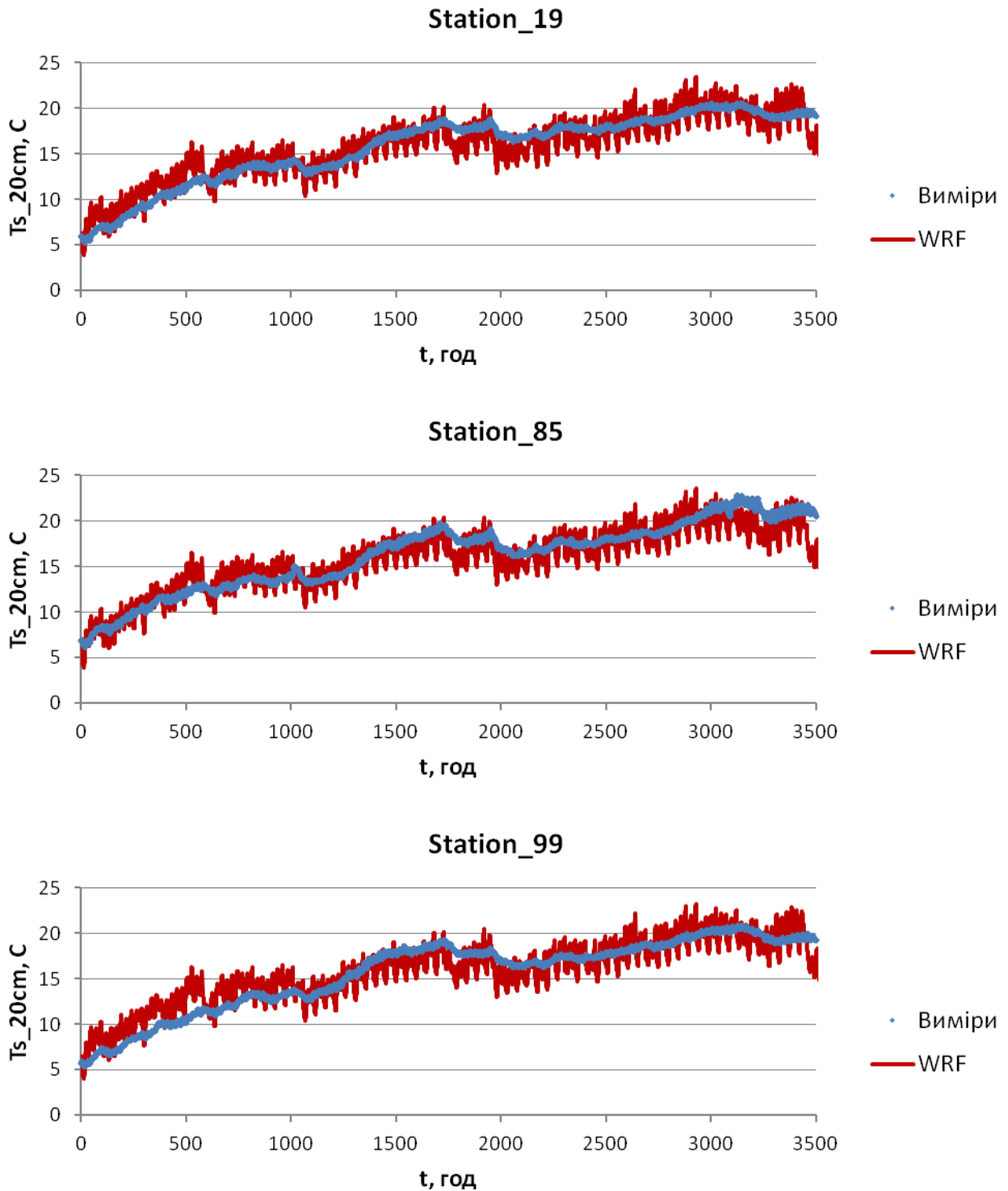


Рисунок 4 – Виміри та результати моделювання температури ґрунту на глибині 20 см для обраних австрійських станцій за період з 1 квітня по 31 серпня 2018 р.

Аналогічне порівняння було здійснене і для вологості ґрунту. Як видно з рис. 5, навіть для «найкращих» станцій розрахована вологість суттєво відрізняється від вимірів за рахунок систематичного заниження вологості ґрунту. Слід зазначити, що у розрахунках вологість ґрунту характеризується значно частішими осциляціями, ніж у вимірах. Причина такої поведінки до кінця незрозуміла і потребує подальших досліджень. У цілому з представлених результатів можна зробити висновок, що WRF-Україна здатна прогнозувати те-

температуру ґрунту на рівні найкращих моделей, тоді прогнозування вологості ґрунту не таке успішне й потребує подальшого покращення.

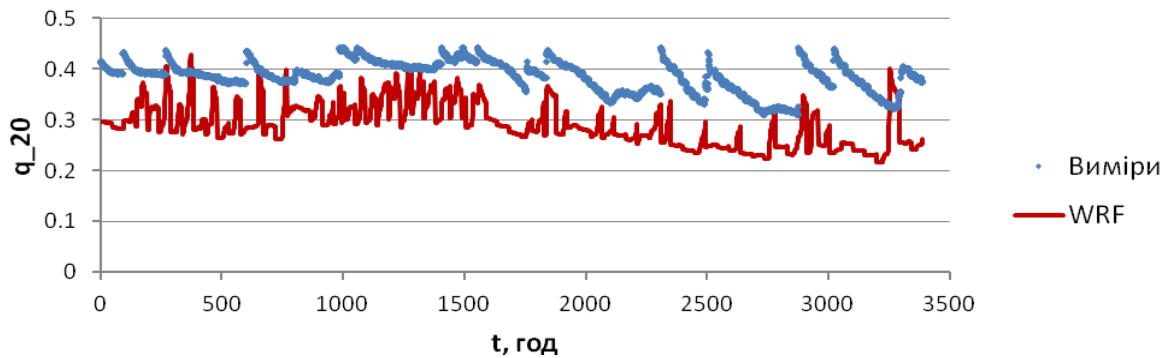


Рисунок 5 – Виміри та результати моделювання відносної вологості ґрунту на глибині 20 см для однієї з австрійських станцій (№ 54) за період з 1 квітня по 31 серпня 2018 р.

5. Висновки

Систему прогнозу погоди WRF-Україна налаштовано для прогнозування на детальних сітках в Україні як стандартних метеорологічних параметрів, так і агрометеорологічних характеристик, таких, як температура та вологість ґрунту. Модель верифіковано на підставі даних вимірів українських та австрійських метеорологічних і агрометеорологічних станцій. Температура повітря, швидкість і напрям вітру, а також температура ґрунту прогножуються на рівні кращих світових аналогів. Середньоквадратична похибка температури ґрунту на основі порівняння з даними українських станцій (декадні середні) складає $1,7^{\circ}\text{C}$ (для прогнозів із завчасністю до 48 год) та $1,9^{\circ}\text{C}$ (для прогнозів з завчасністю 48–96 год). Коефіцієнт кореляції складає 0,92. Середньоквадратична похибка температури ґрунту на основі порівняння з даними щогодинних вимірів австрійських станцій складає $2,2^{\circ}\text{C}$, коефіцієнт кореляції дорівнює 0,87. Результати прогнозування вологості ґрунту виявились не такими успішними. У порівнянні з українськими станціями спостерігалось систематичне завищення вологості ґрунту на 30%. У порівнянні з австрійськими станціями навпаки – заниження вологості на 20%. Коефіцієнти кореляції склали відповідно 0,55 та 0,3. Найвні похибки пояснюються похибками у прогнозуванні опадів та сильною залежністю вологості ґрунту від локальних географічних умов (ухили площадок тощо), які не можуть бути відтворені при встановленому просторовому дозволі моделі. Вплив локальних умов особливо яскраво проявився на прикладі австрійських станцій, коли виміри станцій, розташованих на відстані усього декілька кілометрів одна від одної, практично не корелюють між собою. У майбутньому можливе покращення результатів прогнозування вологості ґрунту шляхом калібрування фізичних параметризацій, введення більш точних характеристик ґрунту та впровадження спеціальних методів ініціалізації характеристик ґрунту. Ще однією можливістю до покращення прогнозування вологості ґрунту буде підключення до системи автономної версії ґрунтової моделі, її налаштування під локальні умови розташування кожної ділянки і виконання нею розрахунків з використанням метеорологічних параметрів, прогнозованих системою WRF-Україна.

ПОДЯКИ

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за конкурсним проектом № Ф76/34278. Автори висловлюють подяку Директору Українського гідрометеорологічного центру М.І. Кульбіді за надання агрометеорологічних вимірів для перевірки моделі WRF, а також начальнику

відділу агрометеорології Укргідрометцентру Т.І. Адаменко за надані консультації стосовно переданих даних.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ковалець І.В., Халченков О.В., Ануліч С.М., Удовенко О.І. Оперативне прогнозування метеорологічних полів для систем попередження про паводки у Карпатах. *Математичні машини і системи*. 2015. № 3. С. 118–125.
2. Халченков А.В., Ковалець І.В., Романенко О.М. Адаптація метеорологічної моделі WRF для прогнозування полів вітру навколо Рівненської АЕС. *Математичні машини і системи*. 2015. № 1. С. 130–138.
3. Andronopoulos S., Ievdin I., Kovalets I., Anulich S. New functionalities developed in the NERIS-TP project regarding meteorological data used by Decision Support Systems. *Radioprotection 51 HSI*. 2016. S13-S16. DOI: 10.1051/radiopro/2016004.
4. Ievdin I.A., Khalchenkov A.V., Kovalets I.V., Raskob W., Trybushny D.M., Zheleznyak M.J. Application of decision support system JRODOS for assessments of atmospheric dispersion and deposition from Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Int. J. of Energy for Clean Environment*. 2012. Vol. 13, N 1–4. P. 179–190. DOI: 10.1615/InterJEnerCleanEnv.2013006151.
5. Ковалець І.В., Синкевич Р.О., Халченков О.В., Удовенко О.І. Соловей Д.Ю., Железняк М.Й., Дорошенко Д.Ю., Булич Я.В., Євдін Є.О. Трибушний Д., Шихтель Т., Мюллер Т., Раскоб В. Адаптація системи РОДОС-Україна для прогнозування пожеж у Чорнобильській зоні відчуження. *Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2018*. (Чернігів-Жукін, 28–29 червня 2018 р.). Чернігів: ЧНТУ, 2018. С. 41–43.
6. Ковалець І.В., Майстренко С.Н, Донцов-Загреба Т.О., Халченков О.В., Ануліч С.М., Полонський О.О., Хурцилава К.В. Веб-система прогнозування метеорологічних умов для довільної території на детальних сітках. *Математичні машини та системи*. 2018. № 1. С. 78–89.
7. Rutledge G., Alpert J., Ebusizaki W. NOMADS – a climate and weather model archive at the National Oceanic and Atmospheric Administration. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2006. Vol. 87. P. 327–341.
8. Dy C.Y., Fung J.C.H. Updated global soil map for the Weather Research and Forecasting model and soil moisture initialization for the Noah land surface model. *J. of Geophysical Research*. 2016. DOI: 10.1002/2015JD024558.
9. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR*. USA, Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2008. 125 p. URL: <http://wrf-model.org/>.
10. Astrup P., Mikkelsen T. Comparison of NWP prognosis and local monitoring data from NPPs. *Radio-protection*. 2010. Vol. 45. P. S97–S111.
11. Kirchengast G., Kabas T., Leuprecht A., Bichler C., Truhetz H. WegenerNet: A pioneering high-resolution network for monitoring weather and climate. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2014. Vol. 95. P. 227–242.
12. Dorigo W.A., Wagner W., Hohensinn R., Hahn S., Paulik C., Xaver A., Gruber A., Drusch M., Mecklenburg S., van Oevelen P., Robock A., Jackson T. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2011. Vol. 15. P. 1675–1698. DOI:10.5194/hess-15-1675-2011.
13. Dorigo W.A., Xaver A., Vreugdenhil M., Gruber A., Hegyiová A., Sanchis-Dufau A.D., Zamojski D., Cordes C., Wagner W., Drusch M. Global Automated Quality Control of In situ Soil Moisture data from the International Soil Moisture Network. *Vadose Zone Journal*. 2013. Vol. 12, N 3. DOI:10.2136/vzj2012.0097.
14. Адаменко Т., Бугаєва А., Десяткова З., Кульбіда М., Щербак Л. Настанова гідрометеорологічним станціям і постам. Випуск 11. Агрометеорологічні спостереження. Київ: Державна гідрометеорологічна служба України, 2007. 357 с.
15. Albergel C., Dutra E., Muñoz-Sabater J., Haiden T., Balsamo G., Beljaars, A., Isaksen L., deRosnay P., Sandu I., Wedi N. Soil temperature at ECMWF: An assessment using ground-based observations. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015. Vol. 120. P. 1361–1373. DOI: 10.1002/2014JD022505.

16. Hong S., Lakshmi V., Small E.E., Chen F., Tewari M., Manning K.W. Effects of vegetation and soil moisture on the simulated land surface processes from the coupled WRF/Noah model. *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. D18118. DOI: 10.1029/2008JD011249.
17. Greve P., Warrach-Sagi K., Wulfmeyer V. Evaluating Soil Water Content in a WRF-Noah Downscaling Experiment. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2013. Vol. 52. P. 2312–2327. URL: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0239.1>.

Стаття надійшла до редакції 20.12.2018