

УДК 556.166.004.94(282.243.7)

Л.О. Горбачова

## **АДАПТАЦІЯ ГІДРОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ «ОПАДИ-СТІК» МІКЕ 11 ДО ГІРСЬКИХ РІЧОК**

Виконано адаптацію гідрологічної моделі NAM RR MIKE 11 до деяких річок Карпатського регіону. Здійснено прогностне гідрологічне моделювання за даними мезомасштабної моделі короткострокового прогнозу погоди WRF NMM та отримано прийнятні результати.

**Ключові слова:** гірські річки, моделювальний комплекс Mike 11, модель «опали-стік», калібрування, прогноз погоди

### **Вступ**

Для районів, що є небезпечними в гідрологічному відношенні, тобто які характеризуються формуванням повеней та паводків різного генезису зі значними й тривалими затопленнями територій, іноді з катастрофічними наслідками, дуже важливим є складання гідрологічних прогнозів з метою своєчасного оперативного інформування відповідних органів управління про небезпечні гідрологічні явища для запобігання їхніх наслідків. На жаль, діюча в гідрометеорологічній службі України система гідрологічного прогнозування не відповідає сучасним вимогам: не дозволяє здійснювати прогнозування рівнів та витрат води в автоматичному режимі. Отже, для України актуальною задачею є адаптація до умов українських річок сучасних комп'ютерних моделюючих комплексів, які сьогодні успішно використовуються у всьому світі. Саме таким моделювальним комплексом є програмний пакет MIKE 11, який є одним з найкращих програмних продуктів нового покоління компанії «DHI Water & Environment» і який прекрасно зарекомендував себе під час моделювання в різних країнах світу.

Необхідно зазначити, що сьогодні в Україні напрямок сучасного гідрологічного моделювання на основі моделювальних програмних комплексів не достатньо розвивається. Переважна більшість наукових публікацій з гідрологічного моделювання присвячена розробкам, методичною базою яких є наукові підходи, що сформувався в 60-

70 роках ХХ століття [1-5] і, зрозуміло, що такі підходи в сучасному світі є застарілими. У поодиноких роботах [6, 7] виконано спробу адаптації розподілених моделей для одного малого гірського водозбору Закарпаття, водозбору р. Стир та для невеличкої ділянки р. Дніпра в м. Києві. Практичне застосування знайшла тільки остання розробка. У той же час, сучасне гідрологічне комп'ютерне моделювання є не тільки інструментом для оперативного прогнозування, але й потужним науковим засобом, який дозволяє виконувати дослідження процесів формування річкового стоку, отримання гідрографів стоку для невивчених басейнів річок, визначення припливу води до водосховищ, вивчення змін водного стоку річок в умовах кліматичних змін та антропогенного навантаження на річки [8]. На жаль, в Україні такі наукові дослідження не проводились, окрім нашої праці [9].

**Метою роботи** є адаптація гідрологічного модуля (NAM) моделі Rainfall-Runoff Mike 11 для моделювання водного режиму гірських річок за різних умов.

### **Виклад основного матеріалу досліджень**

Модель Mike 11 спочатку було розроблено відділом гідродинаміки та водних ресурсів Технічного університету Данії в 1973 р. і з того часу відбувається постійне вдосконалення всіх її модулів (остання оновлена версія Mike 11 вийшла в 2012 р.). В останньому ж керівному документі ВМО з гідрологічної практики, який вийшов друком у 2009 р., Mike 11 рекомендовано для застосування всіма національним гідрометеорологічними службами як один з найуспішніших моделювальних гідрологічних комплексів [10].

Mike 11 – професійний пакет програм для моделювання стоку та якості води, транспорту наносів у річках, естуаріях, системах каналів та інших водних об'єктах. Модель має модульну структуру, яка складається з наступних базових модулів: гідрологічного, гідродинамічного, адвекції-дисперсії та транспорту зв'язаних наносів, якості води, транспорту незв'язаних наносів. Кожен з цих модулів має додаткові більш детальні модулі.

Гідрологічний модуль Rainfall-Runoff (RR) містить додаткові модулі, серед яких для моделювання формування стоку води найбільш вживаними є гідрологічний модуль (NAM), модуль одиничного гідрографа (UHM), модель накопичення вологи ґрунтом (SMAP). Аналіз

літературних джерел щодо використання програмного комплексу MIKE 11 для моделювання й прогнозування повеней й паводків на річках у різних регіонах Європи та світу свідчить про те, що застосування гідрологічного модуля NAM дозволяє найкраще моделювати стік води з водозбору річки, що утворюється від танення снігу і випадіння дощів, та який надалі використовується як боковий приплив у гідродинамічному модулі (HD) [11-14]. Таким чином, модуль NAM найкраще підходить для моделювання стоку води Карпатських річок, для яких характерні сніго-дощові та дощові паводки. Необхідно зазначити, що перспективним для використання є розподілена модель Discharge River Forecast (DRiFt). Однак якісне застосування розподілених моделей сьогодні в Україні не є можливим, по-перше, відсутні цифрові карти рельєфу (ізолінії через 5-15 см) навіть для паводконебезпечних районів Карпатського регіону. По-друге, внаслідок відсутності спостережень за схиловим стоком неможливо виконати якісну верифікацію цього типу моделей [8].

Модуль NAM RR MIKE 11 – неперервна детермінована модель опади-стік із зосередженими параметрами на концептуальній основі, яка описує процеси формування водного стоку на водозборі річки шляхом постійного врахування вмісту води в чотирьох умовних резервуарах: поверхневий, підповерхневий стік, ґрунтові води та сніготанення. Модуль NAM (скорочення з датської мови «Nedbør-Afstrømnings-Model», що значить опади-стік-модель) використовується для моделювання середньовагових значень опадів і водного стоку з водозборів річок площею від декількох км<sup>2</sup> до 10 000 км<sup>2</sup>. Водозбори річок, площа яких перевищує 10 000 км<sup>2</sup> розбиваються на субводозбори. Крім того, модель NAM використовується для: загального гідрологічного аналізу, прогнозування небезпечних повеней та дощових паводків (зазвичай в сукупності з гідродинамічним модулем), відновлення-розширення записів витрат води, прогнозування стоку води в умовах посухи [11].

Процедура калібрування в NAM вирішує наступні цілі:

- досягнення хорошого узгодження між середніми значеннями змодельованого й історичного стоку;
- досягнення хорошого узгодження форми змодельованого й історичного гідрографів;
- досягнення хорошого узгодження максимальних величин змодельованого й історичного стоку;

- досягнення хорошого узгодження мінімальних величин змодельованого й історичного стоку.

Однак у процесі калібрування необхідно знаходити оптимальне рішення з урахуванням пріоритетних цілей моделювання. Так, завжди можна знайти набір параметрів, які забезпечать добре моделювання максимального стоку, але не дуже відповідне моделювання мінімального стоку і навпаки [11]. Ураховуючи те, що для Карпатських річок пріоритетною ціллю моделювання є моделювання максимального стоку води, було виконано калібрування модулю NAM з визначенням набору параметрів, які добре забезпечують саме цей вид моделювання.

Для дослідження обрано три водозбори в Карпатському регіоні: р. Ріка – смт Міжгір'я, р. Боржава – с. Довге та р. Сірет – м. Сторожинець. Для калібрування NAM використано дані гідрометеорологічних спостережень (середньодобові витрати води та температура повітря, добові опади) за період 2007-2009 рр. та добового випаровування з поверхні водозборів, що було розраховано також за період 2007-2009 рр. Приклад виконаного калібрування наведено на рис. 1.

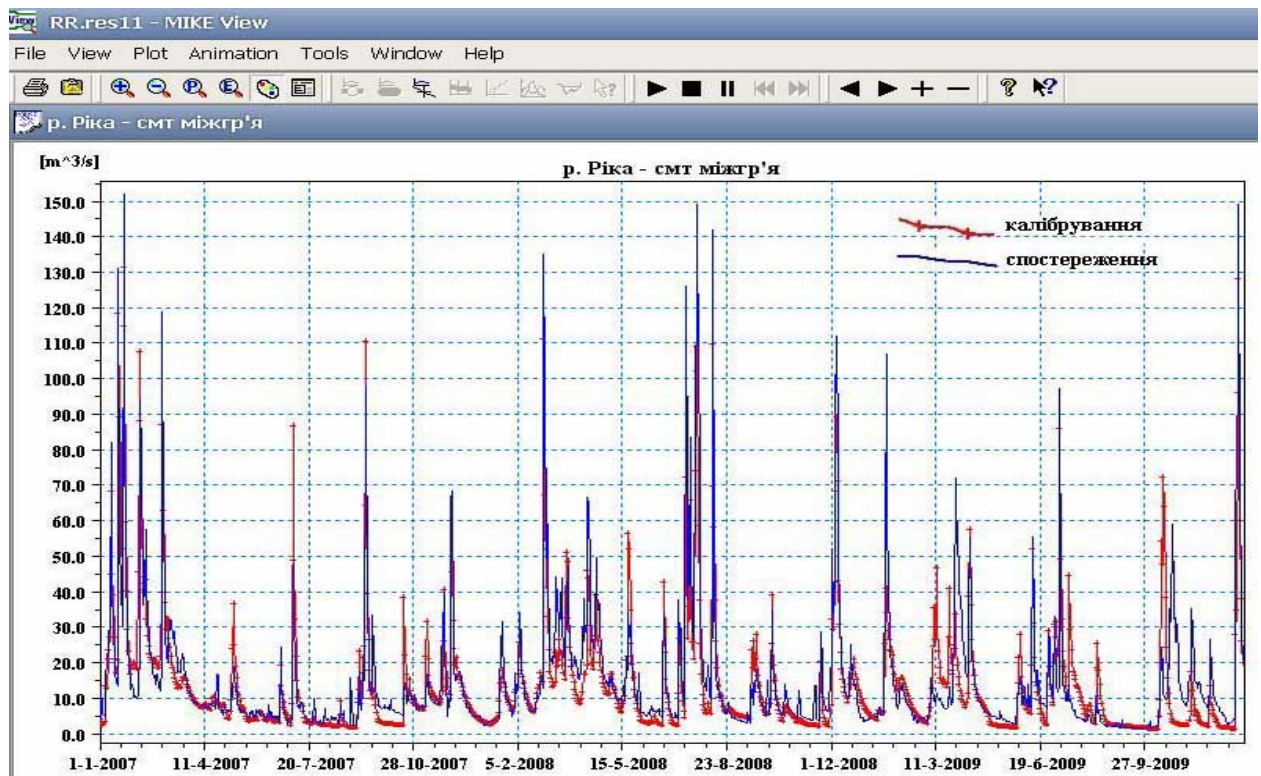


Рис. 1. Результати калібрування модуля NAM RR MIKE 11 для водозбору р. Ріка – смт Міжгір'я, 2007-2009 рр.

За критерій якості виконаного калібрування модуля NAM для водозборів, тобто його ефективності та надійності застосування для

моделювання, було прийнято відношення середньої квадратичної помилки перевірочних прогнозів ( $\bar{S}$ ) до середнього квадратичного відхилення прогнозованої величини ( $\bar{\sigma}$ ), тобто  $\bar{S} / \bar{\sigma}$  [15, 16].

Величини  $\bar{S}$  і  $\bar{\sigma}$  визначалися за формулами:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

де  $y_i$  – значення елемента;  $\bar{y}$  – середнє значення;  $n$  – кількість членів ряду.

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - y')^2}{n}}, \quad (2)$$

де  $y$  – фактичне значення величини;  $y'$  – прогнозне значення.

Результати показників якості калібрування модуля NAM RR MIKE 11 для середньодобових витрат води наведено в табл. 1 та рис. 2. Аналіз результатів показав, що калібрування модуля NAM для середньодобових витрат води для двох гідропостів має задовільну категорію якості, а для одного – добру. Такі показники якості калібрування модуля NAM для зазначених вище водозборів дозволяють використовувати модуль NAM для моделювання витрат води. Найгірший результат калібрування отримано для водозбору р. Боржава – с. Довге. Це можна пояснити тим, що в межах даного водозбору немає жодної метеорологічної станції, атмосферні опади вимірюються тільки в пункті с. Довге. В умовах гірської місцевості недостатність гідрометеорологічних спостережень не дозволяє зробити більш якісне калібрування для цього водозбору.

Таблиця 1

Показники якості калібрування моделі Mike 11 RR NAM для середньодобових витрат води по водозборах Карпатського регіону за період 2007-2009 рр.

Річка - пост	$\bar{S} / \bar{\sigma}$	<b>R</b>	Забезпеченість $\delta_{дон}, \%$
р. Ріка – смт Міжгір'я	0,52	0,86	80,7
р. Боржава – с. Довге	0,67	0,81	68,6
р. Сірет – м. Сторожинець	0,36	0,93	93,8

Водночас для Карпатського регіону, який характеризується формуванням небезпечних паводків різного походження, важливим завданням є прогнозування саме максимальних витрат води.

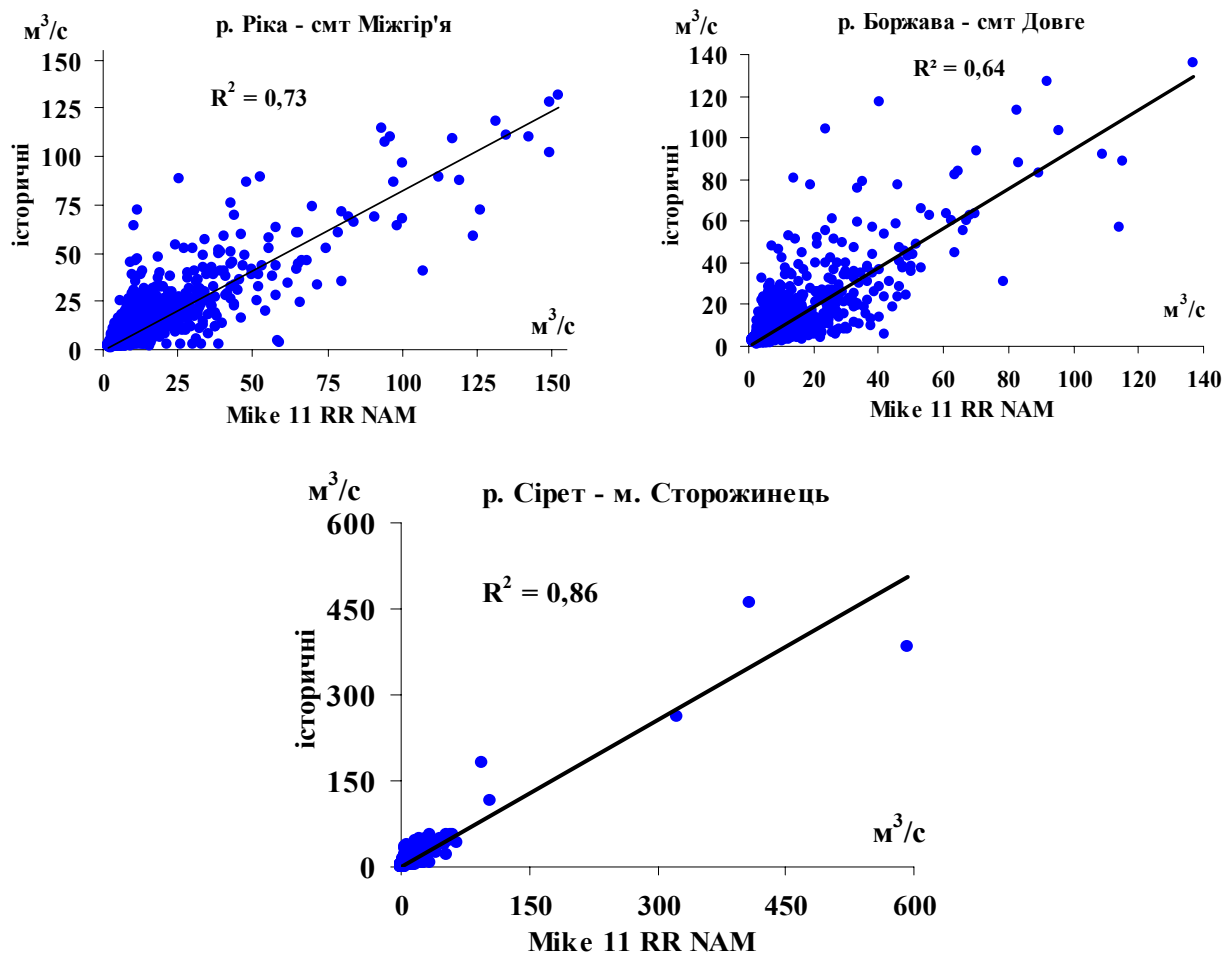


Рис. 2. Кореляційні залежності між середньодобовими витратами води за даними спостережень та середньодобовими витратами води, що були змодельовані модулем NAM RR Mike 11 за період 2007-2009 рр.

Виконаний аналіз показників якості калібрування модуля NAM для максимальних за місяць витрат води (табл. 2, рис. 3) показав наявність доброї категорії якості для двох пунктів спостережень: р. Ріка – смт Міжгір'я та р. Боржава – с. Довге.

Однак для пункту р. Сірет – м. Сторожинець виявилось, що з урахуванням максимальної витрати води за липень 2008 р. оцінка якості калібрування має добру категорію (див. табл. 2, значення в дужках та рис.3 а), але ця оцінка є некоректною, оскільки таке значення значно відхиляється від інших членів ряду. Таким чином, для пункту р. Сірет –

м. Сторожинець отримано задовільну оцінку якості калібрування для максимальних за місяць витрат води (рис. 3 б).

Таблиця 2

Показники якості калібрування моделі Mike 11 RR NAM для максимальних за місяць витрат води по водозборах Карпатського регіону за період 2007-2009 рр.

Річка - пост	$\bar{S} / \bar{\sigma}$	$R$	Забезпеченість $\delta_{доп}, \%$
р. Ріка – смт Міжгір'я	0,45	0,88	86,5
р. Боржава – с. Довге	0,45	0,89	86,5
р. Сірет – м. Сторожинець	(0,26) 0,65	(0,99) 0,78	(99,1) 70,0

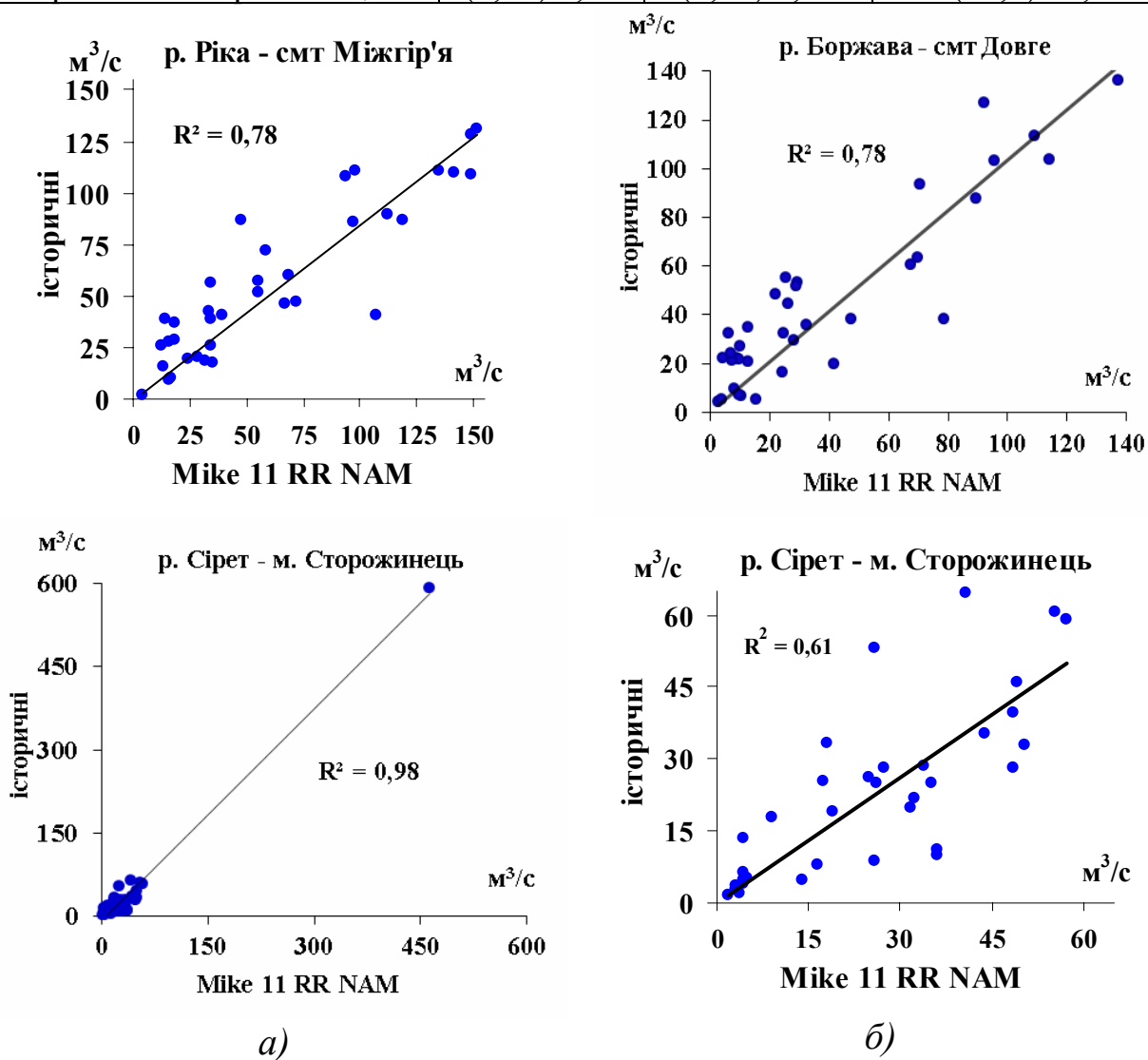


Рис. 3. Кореляційні залежності між максимальними за місяць витратами води за даними спостережень та максимальними за місяць витратами води, що були змодельовані модулем NAM RR Mike 11 за період 2007-2009 рр.

Отримані результати дозволяють використовувати модуль NAM RR Mike 11 для моделювання витрат води для зазначених вище водозборів.

У сучасному світі оперативне гідрологічне прогнозування виконується на основі використання даних прогнозу погоди. Саме тому надалі було виконано прогнозне моделювання витрат води для обраних весняного та зимового паводків 2010 р., які відбулися в басейні р.Тиса (рис. 4).

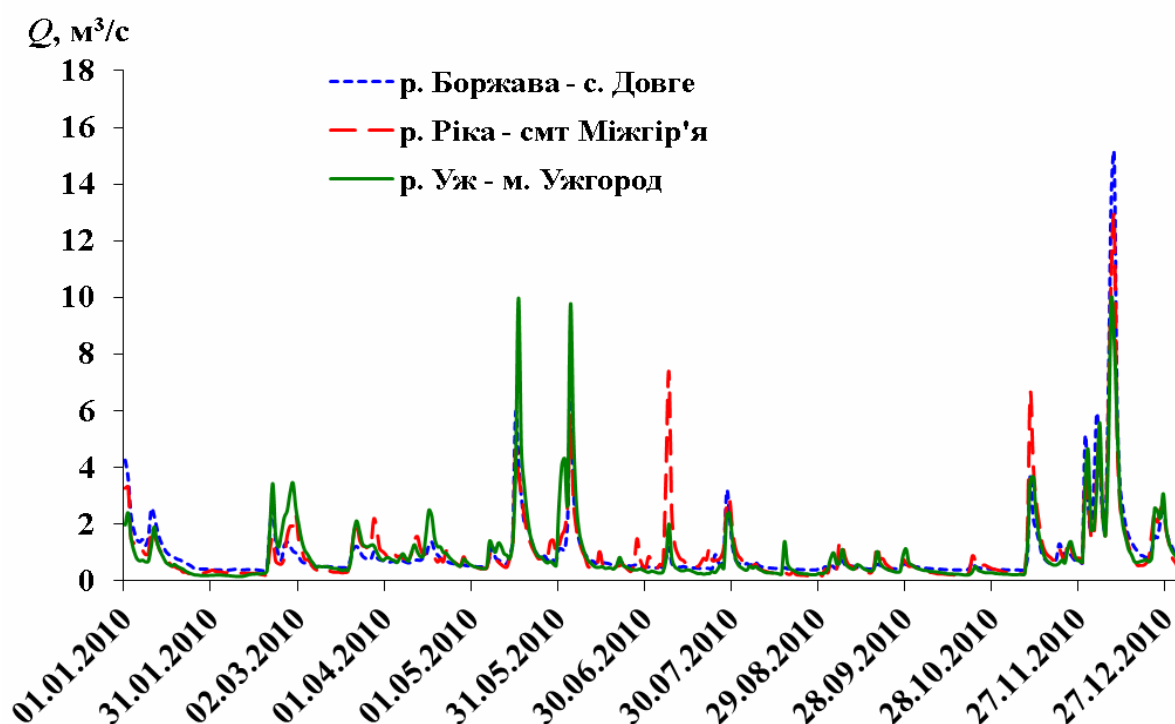


Рис. 4. Гідрографи, басейн р. Тиса, 2010

В останні роки в УкрНДГМІ успішно адаптується мезомасштабна модель короткострокового прогнозу погоди WRF NMM. Прогнозні осереднені значення для водозборів р. Ріка – смт Міжгір'я та р. Боржава – с. Довге середньодобової температури повітря, добових опадів та добового випаровування отримано з архівних прогнозних даних моделювання моделі WRF NMM із завчасністю 1-3 доби для періодів весняного та зимового паводків 2010 р. [17]. Аналіз результатів моделювання за модулем NAM RR Mike 11 (табл. 3 та рис. 5) показав, що розрахункове моделювання (за даними спостережень) максимальної витрати води для двох водозборів як для весняного, так і для зимового паводків має значно меншу за гранично допустиму похибку (20 %). Для прогнозного моделювання (за даними WRF NMM) найкращі результати отримано на першу добу прогнозу для весняного паводка для водозбору



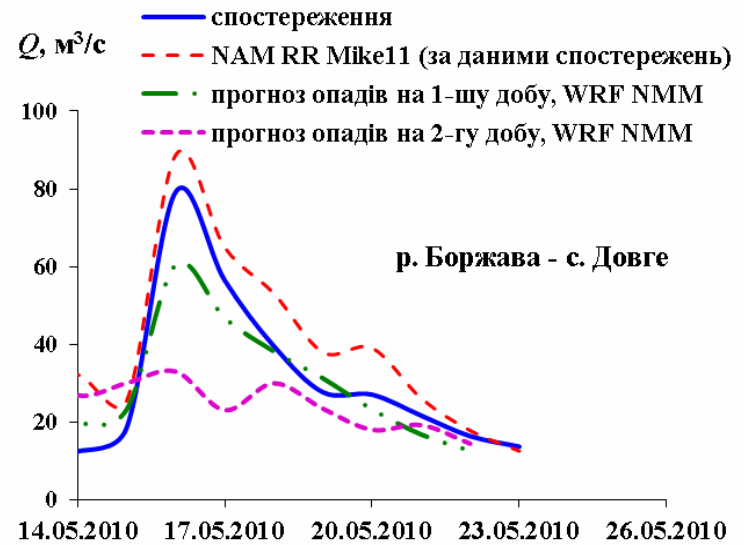
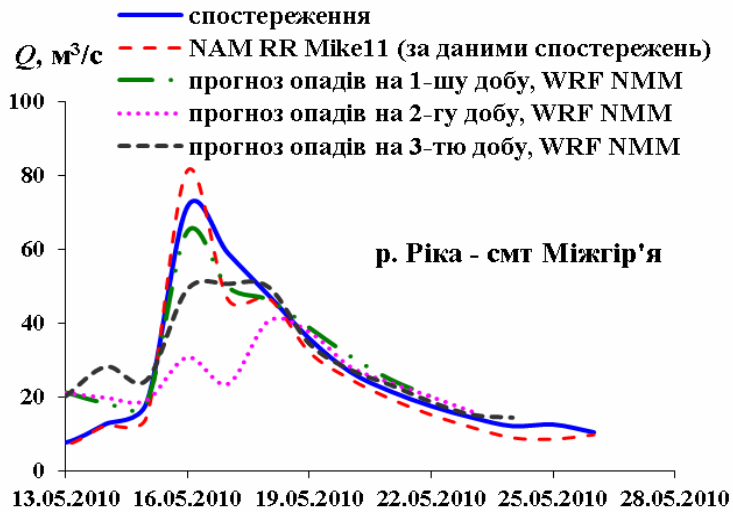
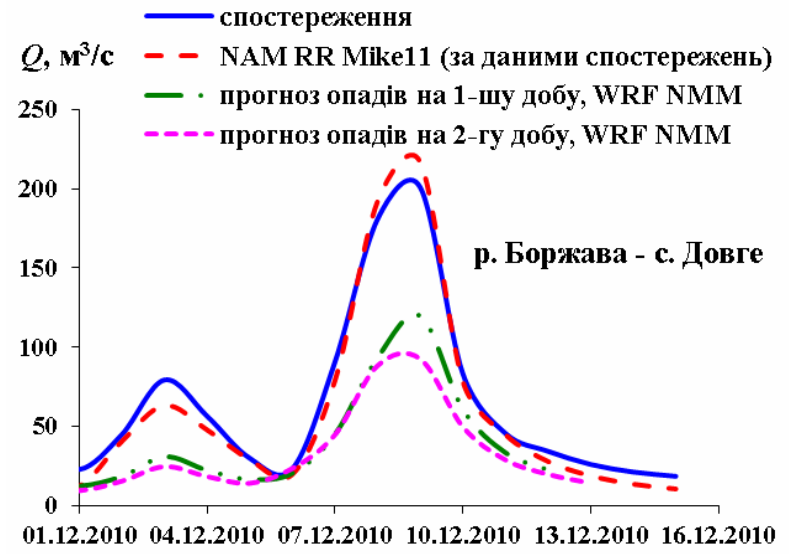
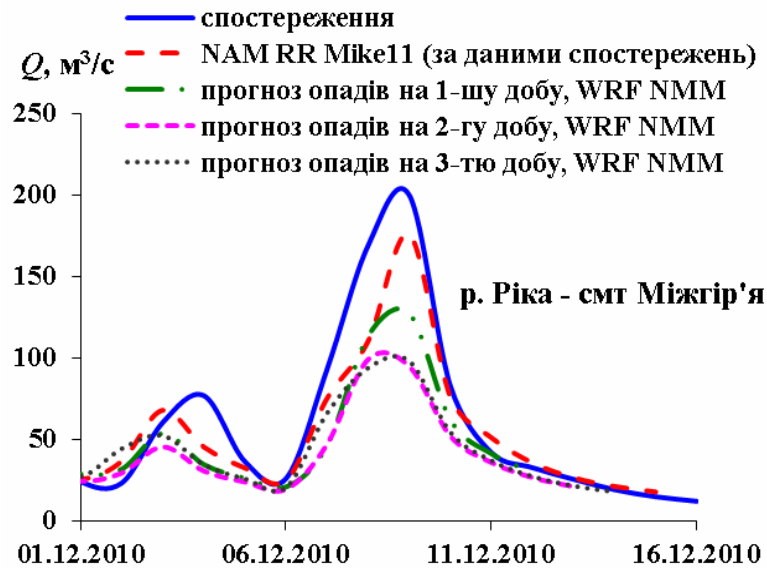


Рис. 5. Фактичний та прогнозні гідрографи, 2010 р.

р. Ріка – смт Міжгір'я, що пояснюється точністю прогнозування опадів. Зрозуміло, що прогнозування опадів у гірській місцевості є складним науковим завданням, яке, до речі, сьогодні в світі не повністю вирішене.

Таблиця 3

Похибки середньодобової максимальної витрати води, %

Річка - пункт	NAM RR Mike 11 (дані спостережень)	WRF NMM, 1 доба прогнозу	NAM RR Mike 11 (дані спостережень)	WRF NMM, 1 доба прогнозу
	весна		зима	
р. Ріка – смт Міжгір'я	13,7	9,37	12,0	36,3
р. Боржава – с. Довге	12,0	23,7	7,93	40,4

### Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Доведено, що гідрологічний модуль NAM моделі «опад-стік» (RR) програмного моделювального комплексу Mike 11 доцільно використовувати для розрахункового та прогнозного моделювання максимальних витрат води гірських річок Закарпаття.
2. Виконано адаптацію NAM RR Mike 11 до деяких річок Закарпаття та отримано добрі та задовільні показники якості калібрування NAM як для середньодобових, так і для максимальних витрат води, що й дозволяє рекомендувати його для оперативного та наукового моделювання.
3. Якість калібрування модуля NAM залежить від якості та наявності гідрометеорологічних даних та впливу антропогенної діяльності на водний стік. Останній обов'язково треба враховувати, що ускладнює процедуру калібрування.
4. Здійснено прогнозне моделювання витрат води з використанням даних прогнозу погоди (осереднені по водозборах річок) мезомасштабної моделі короткострокового прогнозу погоди WRF NMM та отримано прийнятні результати.
5. Наступним кроком має бути як адаптація NAM RR Mike 11 до інших водозборів річок, так і деталізація моделювання за часом, тобто моделювання не тільки середньодобових витрат води, але, наприклад, через 6 або 3 години. Крім того, виконана адаптація NAM також дозволяє виконувати наукові дослідження – аналіз змін водного стоку річок під впливом кліматичних змін, антропогенної діяльності і т.п.

\* \*

1. *Лук'янець О.І.* Система прогнозування паводків у Закарпатті на основі дослідження та математичного моделювання процесів формування стоку: Автореф. дис. ... к.геогр.н.: 11.00.07 / К. – 2004. – 20 с.
2. *Приймаченко Н.В.* Обґрунтування системи розрахунку характеристик паводків на гірських річках басейну Дністра на основі математичного моделювання процесів формування дощового стоку: Автореф. дис... к. геогр. н.: 11.00.07 / К. – 2010. – 19 с.
3. *Сусідко М.М., Маслова Т.В., Липкань О.А.* Технологія взаємодії математичних моделей формування стоку // *Наук. пр. УкрНДГМІ.* – 2011. – Вип. 260. – С. 158-174.
4. *Дутко В.О., Сосєдко М.М.* Із досвіду ідентифікації параметрів математичної моделі дощового стоку в залежності від орографії місцевості // *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія.* – 2011. – Т. 3 (24). – С. 73-80.
5. *Москаленко С.О.* Оцінка достовірності визначення параметрів водоутворення математичної моделі дощових паводків для малих водозборів Правобережжя Прип'яті // *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія.* – 2012. – Т. 2 (27). – С. 23-29.
6. *Бойко О.В., Железняк М.Й.* Впровадження розподіленої моделі опади-стік для прогнозування стоку річок Закарпаття і басейну Прип'яті // *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія: Матеріали п'ятої Всеукр. наук. конф. – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т.* – 2011.– С. 17-19.
7. *Бойко В.М., Железняк М.Й., Коломієць П.С.* Особливості формування весняного стоку Дніпра та моделювання зони затоплення у межах м. Києва на основі сучасної гідролого-гідродинамічної моделі // *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія: Матеріали п'ятої Всеукр. наук. конф. – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т.* – 2011. – С. 14-16.
8. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* *Современные проблемы гидрологии.* – М.: Академия, 2008. – 319 с.
9. *Gorbachova L.O. & Nabyvanets Yu.B.* Forecasted estimations of runoff change in the Dniester Basin under conditions of climate change // *EGU Leonardo 2012, "Hydrology and Society", November 14<sup>th</sup> – November 16<sup>th</sup>, Torino, Italy.* – 87 с.
10. *Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. Sixth edition.* – WMO-No. 168, 2009.
11. *Mike 11. A Modelling System for Rivers and Channels. Reference Manual // MIKE by DHI Software 2007, 516 p.*

12. *Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. River Flow Forecasting Through Conceptual Models, Part 1: A Discussion on Principals // Journal of Hydrology, 1970, V10, P.282-290.*
13. *Supiah Shamsudin & Normala Hashim Rainfall runoff simulation using Make11 NAM // Jurnal Kejuruteraan awam (Journal of Civil Engineering), Vol. 15, № 2, 2002, P. 1-13.*
14. *Bahremand A. & De Smedt F. Distributed Hydrological Modeling and Sensitivity Analysis in Torysa Watershed, Slovakia // Water Resour Manage, 2008, 22:393–408.*
15. *Настанова з оперативної гідрології. Прогнози режиму вод суші. Гідрологічне забезпечення і обслуговування. – К.: Верлан, 2012. – 120 с.*
16. *Бэфани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 390 с.*
17. *Розроблення та впровадження багаторівневої системи гідрометеорологічного прогнозування в басейнах річок Карпатського регіону на основі чисельного моделювання, використання супутникових технологій та багатофункціональних гідрологічних програмних комплексів. Звіт про НДР (2012) // УкрНДГМІ; № д.р. 0109U004256 – К., 2012. – 71 с.*

*Український науково-дослідний  
гідрометеорологічний інститут, Київ*

**Горбачёва Л.А.**

**Адаптация гидрологической модели «осадки-сток» Mike 11 к горным рекам**

*Выполнена адаптация гидрологической модели NAM RR MIKE 11 для некоторых рек Карпатского региона. Реализовано прогнозное гидрологическое моделирование по данным мезомасштабной модели краткосрочного прогноза погоды WRF NMM и получены приемлемые результаты.*

**Ключевые слова:** горные реки, моделирующий комплекс Mike 11, модель «осадки-сток», калибровка, прогноз погоды.

**Gorbachova L.**

**Adaptation of the hydrological «Rainfall-Runoff» Mike 11 model to Mountain Rivers**

*The adaptation of the hydrological MIKE 11 NAM RR model for some rivers Carpathian region was carried out. The forecast hydrologic modeling on the data of the short-term weather forecast of the WRF NMM model was realized and the acceptable results were received.*

**Keywords:** Mountain Rivers, modeling complex Mike 11, model «Rainfall-Runoff», calibration, weather forecast.