

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПАВОДКОВИХ ЗАХОДІВ НА МАЛИХ РІЧКОВИХ ВОДОЗБОРАХ ЗАКАРПАТТЯ НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКІВ РОЗПОДІЛЕНОЇ МОДЕЛІ «ОПАДИ-СТІК»

Анотація. У статті подано опис та основні рівняння розподіленої фізично-обґрунтованої гідрологічної моделі процесів «опад-стік» та її застосування для розрахунків ефективності протипаводкових заходів на прикладі малого водозбору в с. Квасово (Закарпатська область, Україна). Проведена реконструкція паводкового стоку 1998 року для водозбору, що розглядається. Результати було використано для аналізу ефективності дренажного каналу, який був запланований у рамках державної програми «Комплексного протипаводкового захисту в басейні р. Тиса в Закарпатській області».

Ключові слова: паводок, протипаводкові заходи, опад-стік, розподілені фізично-обґрунтовані моделі стока, водозбірна гідрологія, ГІС.

Аннотация. В статье приведены описание и основные уравнения распределенной физически обоснованной гидрологической модели процессов «осадки-сток» и ее применение для расчетов эффективности противопаводковых мероприятий на примере малого водосбора с. Квасово (Закарпатская область, Украина). Проведена реконструкция паводочного стока 1998 года для рассматриваемого водосбора. Результаты были использованы для анализа эффективности дренажного канала, который был запланирован в рамках государственной программы «Комплексной противопаводковой защиты в бассейне р. Тиса в Закарпатской области».

Ключевые слова: паводок, противопаводковые мероприятия, осадки-сток, распределенные физически-обоснованные модели стока, водосборная гидрология, ГИС.

Abstract. The description and the main equations of a distributed physically based hydrological model of the "Precipitation-Sink" processes and its application for calculating the effectiveness of anti-flood measures on the example of small reservoir in the village Kvasovo (Transcarpathian region, Ukraine) are regarded in the article. The reconstruction of the flood sink of 1998 for the reservoir was carried out. The results were used to analyze the effectiveness of drainage channel that was planned by the state program "Complex anti-flood protection in the Tisza River Basin in Transcarpathian region".

Keywords: flood, anti-flood measures, precipitation-sink, distributed physically based sink models, hydrology reservoirs, GIS.

1. Вступ

Математичні моделі формування річкового стоку (або моделювання процесу „опад-стік”) на водозборі поділяються на дві категорії моделей:

- Моделі із зосередженими параметрами.
- Моделі із розподіленими параметрами.

Приведена класифікація базується на різному за деталізацією підході до опису фізичного процесу стоку води з водозбору, тобто трансформації опадів у річковий стік [1].

Моделі із зосередженими параметрами не враховують просторову змінність фізико-географічних характеристик водозбору, при їх розробці нехтують деталізацією процесів стокоформування на окремих ділянках і оперують з деякими інтегральними для всього досліджуваного водозбору характеристиками, тобто оцінюють середні для водозбору параметри. Такі моделі представляють водозбір у вигляді боксів або «чорних ящиків», кожний з яких описує певну компоненту стоку – поверхневий стік, стік у верхніх шарах ґрунту (так званий підповерхневий стік), підземний стік і т.д., параметри яких не змінюються у межах басейну. Розрахунок стоку в кожному боксі та потоків між ними виконується на основі балансових співвідношень (рівняння водного балансу). Як правило, параметри таких моде-

лей встановлюються емпіричним або напівемпіричним шляхом на основі аналізу багаторічних рядів спостережень за гідрометеорологічними факторами стоку (такими, як опади, випаровування, сніговий покрив, температура повітря тощо) і безпосередньо самим річковим стоком. Таким чином, застосовуючи методи оптимізації, отримують приблизні оцінки параметрів, при яких є найкраща відповідність між фактичним та розрахованим гідрографами.

Прикладами моделей із зосередженими параметрами є НЕС-1, НУМО, tank model, NAM [1], а також вітчизняні моделі СНІГ, СЛОЙ, ДОЩ [2].

З розвитком обчислювальних потужностей, прогресом у галузі геоінформаційних систем (ГІС) і удосконалення засобів вимірювання з 80-тих років минулого століття на перший план виходить новий клас моделей – моделі із розподіленими параметрами.

В основі розподілених моделей «опади – стік» лежать фізичні закони збереження маси, енергії та імпульсу. Моделі базуються на чисельному розв'язку системи одновимірних гіперболічних рівнянь у часткових похідних – рівнянь Сен-Венана та їх спрощених варіантів – рівнянь дифузійної і кінематичної хвилі [3, 4].

На відміну від моделей із зосередженими параметрами, розподілені моделі базуються на сіткових (растрових) методах, у яких інформація про водозбір представляється у вигляді сіток (кінцево-різницевої, кінцево-елементної та растрових) із відповідним просторовим кроком. Сітки (Grids) відображують детальну інформацію про ландшафт водозбору: топографію, землекористування, рослинність, типи ґрунтів. Значення в елементах (комірках) сітки являються параметрами моделі. Відповідні карти отримують за допомогою супутникових зйомок або ж детальних геодезичних робіт та інструментальних досліджень компонентів ландшафту. Завдяки цьому, враховується фізико-географічна неоднорідність території водозбору.

Внаслідок можливості застосування таких підходів моделі із розподіленими параметрами використовують меншу кількість емпіричних (евристичних) параметрів, отриманих в результаті вивчення і статистичної обробки багаторічних залежностей опадів і стоку на водозборі. Тобто можна говорити про наявність фізичного змісту у параметрах розподілених моделей, оскільки вони можуть бути безпосередньо виміряні під час польових експедицій і т.п. Цей факт вигідно вирізняє розподілені моделі від моделей із зосередженими параметрами і дозволяє більш швидко та ефективно налаштовувати параметри моделі, використовувати моделі такого класу для розрахунків стоку на не вивчених у гідрологічному відношенні територіях, тобто на водозборах з недостатньою кількістю даних натурних спостережень за елементами водного режиму або ж їх повною відсутністю [1, 5–7].

Як приклади розподілених моделей «опади – стік» можна привести такі моделі: SHE [8], TOPMODEL [9], ТОРКАРІ [10], Гідравлічна модель Морського гідрофізичного інституту НАН України [11].

В ПММС НАН України розроблено нову комп'ютерну реалізацію моделі ТОРКАРІ – ТОПКАПІ-ПММС на основі нових обчислювальних алгоритмів, що допускають розпаралелення моделі. Саме рівняння ТОРКАРІ були обрані для розробки нового коду у зв'язку з продемонстрованими можливостями прогнозування на її основі стоку з водозборів у широкому діапазоні розмірів – від малих до середніх і великих річок [10]. Стаття присвячена опису моделі ТОПКАПІ-ПММС та результатам її тестового впровадження для водозбору Квасово.

Моделю належить до класу фізично-обґрунтованих розподілених моделей процесів «опади-стік». Моделю базується на застосуванні рівняння «кінематичної хвилі» для опису динаміки процесів стоку. Базуючись на головній вхідній ГІС-інформації моделі – цифровій карті висот (DEM, Digital Elevation Model) території, водозбір представляється сукупністю квадратних елементів (комірок), що утворюють розрахункову сітку моделі. Такий підхід властивий усім розподіленим моделям формування стоку.

Кожний елемент сітки являє собою розрахунковий вузол моделі і має свій набір фізичних характеристик, які беруться з цифрових карт ґрунтів, землекористування та карти підстильної поверхні. Таким чином враховується природна неоднорідність фізико-географічних характеристик водозбору. Для кожного елемента сітки моделі розв'язуються рівняння моделі, а сукупний стік розраховується шляхом побудови так званого «дерева стоку», «корінь» якого знаходиться в замикальному створі водозбору. Напрямки руху води у дереві стоку задаються згідно з таким принципом: вода з довільної комірки надходить в одну з чотирьох сусідніх комірок, з якою різниця у висоті є найбільшою.

Модель розраховує такі компоненти стоку з водозбору:

- Стік у верхньому шарі ґрунтів.
- Поверхневий стік або стік по схилах водозбору.
- Стік у руслах річок та природних водотоках.

Як було зазначено вище, модель описує динаміку руху води на базі рівнянь «кінематичної хвилі» [3], яке для всіх трьох компонентів стоку може бути записано у загальній формі:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} = p - \frac{\partial q}{\partial x}, \\ q = ch^\alpha \end{cases} \quad (1)$$

де x – напрямок руху води в елементі водозбору (просторовий розмір елемента), t – час, h – рівень води, p – інтенсивність надходження води у розрахунковий вузол у вигляді опадів, бічного припливу або водовіддачі ґрунтових вод, q – витрати води на одиницю площі, c – параметр, що розраховується згідно з фізичними характеристиками водозбору і приймає значення або коефіцієнта гідравлічної шорсткості (коефіцієнт Маннінга), або гідравлічної провідності ґрунту в залежності від компоненти процесу стоку, що розраховується, α – є певним гідравлічним параметром елемента, зміст якого буде розкрито далі.

Система рівнянь (1) перетворюється в звичайне диференціальне рівняння шляхом підстановки другого рівняння в перше та інтегруванням по x – координаті. Загальний вигляд отриманого рівняння можна записати у вигляді

$$\frac{dh}{dt} = a - bh^c \quad (2)$$

Розв'язок рівняння (2) неможливо отримати аналітичним шляхом. Як чисельна схема рішення диференційного рівняння використовується метод Рунге-Кутта п'ятого порядку з адаптивним кроком [12].

2. Модуль ґрунтового стоку

Модуль ґрунтового стоку розраховує стік води у верхньому шарі ґрунту глибиною до 2–3 метрів. Процес ґрунтового стоку можна розділити на дві фази: інфільтрація води у ґрунт з поверхні та рух води у ґрунті у горизонтальному напрямку – у напрямку, що відповідає «дереву стоку». Для опису цих процесів вводяться такі припущення:

1) Оподи в межах окремого елемента водозбору (розрахункового вузла) вважаються рівномірними.

2) Всі оподи інфільтруються у ґрунт, доки він не досягне стану насичення. Таке припущення відомо як гіпотеза Дюнна щодо виникнення поверхневого стоку з водозборів [13].

3) Нахил дзеркала води у ґрунті елемента водозбору вважається рівним нахилу поверхні елемента.

4) Показник гідравлічної провідності не змінюється з глибиною і вважається наба-

гато більшим, ніж у більш глибоких шарах ґрунту.

5) Стік води у ґрунтовому шарі залежить від загального вмісту вологи у ґрунті.

Завдяки високій провідності верхнього шару ґрунту, що викликаний макропорами, сили гравітації є доміантним механізмом переміщення вологи від верхньої границі ґрунту до нижньої, для якої характерна низька проникність, отже саме в верхньому шарі буде виникати значущий горизонтальний ґрунтовий стік [6, 10, 14]. Також слід зазначити, що глибина високопровідного шару ґрунту (від декількох сантиметрів до декількох метрів) є мала у порівнянні з горизонтальною розмірністю розрахункового вузла моделі (десятки, сотні метрів). Враховуючи цей факт, фазою інфільтрації у ґрунт можна знехтувати як швидкоплинню і вважати, що вода надходить у ґрунт без затримки у часі [15], і розраховувати тільки горизонтальний стік у ґрунті.

Отримання системи рівнянь «кінематичної хвилі» для горизонтального ґрунтового стоку детально викладено в роботах [10, 14]. Наведемо лише основний результат який використовується в реалізації моделі ТОПКАПІ-ІПММС:

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta}{\partial t} = r - \frac{\partial q}{\partial x} \\ q = \frac{Lk_s \tan(\beta)}{(\vartheta_s - \vartheta_r)^\alpha L^\alpha} \eta^\alpha = C\eta^\alpha \end{cases}, \quad (3)$$

де q – горизонтальний потік у ґрунті (витрати на одиницю ширини), r – інтенсивність надходження води в елемент водозбору у вигляді опадів та бічного припливу з сусідніх елементів, η – вміст води (м) у шарі ґрунту вздовж вертикального перерізу, L – глибина шару ґрунту, в якому відбувається горизонтальний стік, k_s – коефіцієнт гідравлічної провідності ґрунту у стані насичення, β – кут нахилу поверхні елемента (комірки) розрахункової сітки водозбору, ϑ_r – кількість води, як частка від товщини шару, що не піддається фільтрації капілярами та силами гравітації, ϑ_s – максимально можлива кількість води, як частка від товщини шару ґрунту, α – певний гідравлічний параметр ґрунту елемента водозбору, значення якого виведено експериментальними дослідженнями [16].

Для довільного розрахункового елемента водозбору i шляхом інтегрування першого рівняння системи (3) по x та записуючи вміст води у термінах об'єму, можемо записати таке балансове рівняння:

$$\frac{\partial V_{s_i}}{\partial t} = (r_i x^2 + q_{o_i}^u + q_{s_i}^u) - \frac{C_{s_i} x}{x^{2\alpha}} V_{s_i}^{\alpha_s}, \quad (4)$$

де V_{s_i} – об'єм води у ґрунті i -ого елемента у м^3 , $q_{o_i}^u$ – приплив води до i -ого елемента через поверхневий стік у $\text{м}^3/\text{с}$, $q_{s_i}^u$ – приплив води до i -ого елемента через ґрунтовий стік у $\text{м}^3/\text{с}$, індекс s (soil) означає, що рівняння записано для процесу ґрунтового стоку.

Для кожного часового кроку моделювання t можна записати такі рівняння водного балансу та вираз для розрахунку надлишку води, що не була інфільтрована у ґрунт, у випадку насичення:

$$Q_{s_i}^d = (r_i x^2 + q_{o_i}^u + q_{s_i}^u) - \frac{V_{s_i}'(t_0 + T) - V_{s_i}(t_0)}{T}, \quad (5)$$

$$e_{o_i} = \max\{[V_{s_i}'(t_0 + T) - \min(V_{s_i}'(t_0 + T), V_{sm_i})], 0\}, \quad (6)$$

$$V_{s_i}(t_0 + T) = \min[V_{s_i}'(t_0 + T), V_{sm_i}], \quad (7)$$

де T – розрахунковий крок моделі, t_0 – початковий момент часу кроку обчислення, $V_{s_i}'(t_0 + T)$ – розв'язок рівняння (4) для моменту часу $t_0 + T$, m^3 , $Q_{s_i}^d$ – стік з i -ого елемента водозбору за проміжок $t_0 \sim t_0 + T$, m^3/c ; e_{o_i} – надлишок води, m^3 , що не може бути інфільтрований у ґрунт у результаті насичення верхнього шару, внаслідок цього виникає процес поверхневого стоку, і ця величина передається як гранична умова для модуля поверхневого стоку, V_{sm_i} – об'єм води у верхньому шарі ґрунту у разі насиченого стану, m^3 , $V_{s_i}(t_0 + T)$ – об'єм води у верхньому шарі ґрунту i -ого елемента водозбору в момент $t_0 + T$, m^3 .

3. Модуль поверхневого стоку

У моделі ТОРКАРІ процес поверхневого стоку (стік по схилах водозбору), по аналогії з ґрунтовим, описується рівняннями «кінематичної хвилі». Оскільки припускається, що опади будуть інфільтруватися, доки ґрунт не набуде стану насичення. Граничними умовами для рівнянь процесу поверхневого стоку будуть надлишкові опади (infiltration excess) та ексфільтрована вода з ґрунту (ex-filtration excess), які розраховуються згідно з (4) та (6). Нижче наведено систему рівнянь «кінематичної хвилі» (8) та балансове рівняння для процесу поверхневого стоку в i -ому елементі водозбору (9), яке отримано з (8) по аналогії з рівняннями ґрунтового стоку:

$$\begin{cases} \frac{\partial h_o}{\partial t} = e_o - \frac{\partial q_o}{\partial x} \\ q_o = \frac{1}{n_o} (\tan(\beta))^{1/2} h_o^{5/3} = C_o h_o^{\alpha_o} \end{cases}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial V_{o_i}}{\partial t} = e_{o_i} x^2 - \frac{C_{o_i} x}{x^{2\alpha_o}} V_{o_i}^{\alpha_o}, \quad (9)$$

де індекс O означає, що описується процес поверхневого стоку (overland flow), h_o – глибина шару води поверхневого стоку, м, q_o – горизонтальний потік по поверхні елемента водозбору (витрати), m^3/c , e_o – сума надлишкових опадів та ексфільтрованої води з ґрунту, м/с, n_o – коефіцієнт шорсткості поверхні елемента водозбору (коефіцієнт Маннінга), $C_{o_i} = \tan(\beta_i)^{1/2} / n_{o_i}$ – коефіцієнт, отриманий шляхом застосування формули Маннінга, формально еквівалентний коефіцієнту C_{s_i} для ґрунтового стоку, V_{o_i} – об'єм води на поверхні елемента водозбору на одиницю ширини, m^2 , $\tan(\beta_i)$ – тангенс кута нахилу поверхні розрахункового елемента i , $\alpha_o = 5/3$ – параметр, що отримується з формули Маннінга [3].

Так само, за аналогією з модулем ґрунтового стоку для кожного часового кроку моделювання t , можна записати вираз для розрахунку поверхневого стоку (m^3/c) з i -ого елемента водозбору:

$$Q_{o_i}^d = (e_{o_i} x^2) - \frac{V_{o_i}(t_0 + T) - V_{o_i}(t_0)}{T}, \quad (10)$$

де $Q_{o_i}^d$ – стік з i -ого елемента водозбору за проміжок $t_0 \sim t_0 + T$, m^3/c .

4. Модуль стоку у руслах річок та природних водотоків

Наявність русла у довільному елементі водозбору визначається як функція від площі всіх елементів, вода з яких надходить до нього [5]. Відповідно, чим для більшої кількості елементів даний елемент є «батьківським» у «дереві стоку», тим вірогідніше, що він є руслом річки чи природного водотоку. Наявність русла і його ширина визначаються таким чином:

$$A_{dr} > A_{th}, \quad (11)$$

$$w_i = w_{max} + \left[\frac{w_{max} - w_{min}}{\sqrt{A_{tot}} - \sqrt{A_{th}}} \right] \left(\sqrt{A_{dr}} - \sqrt{A_{tot}} \right), \quad (12)$$

де перший вираз є перевіркою на наявність русла в елементі, а саме, якщо A_{dr} – площа території, що дронується в елемент водозбору, більше за певне порогове значення площі дренажу A_{th} , яке задано в залежності від гідрологічних особливостей водозбору, то елемент є руслом; w_i – ширина русла у i -ому елементі; w_{max} та w_{min} – максимально та мінімально можлива ширина русла відповідно, що задається в залежності від гідроморфологічних особливостей водозбору; A_{tot} – загальна площа водозбору як сума площ всіх елементів водозбору, з яких побудоване «дерево стоку». Процес руслового стоку, так само, як ґрунтовий і поверхневий стоки, базується на системі рівнянь «кінематичної хвилі» і для довільного русла прямокутної форми може бути записаний у вигляді

$$\begin{cases} \frac{\partial h_c}{\partial t} = r_c - \frac{\partial q_c}{\partial x} \\ q_c = \frac{1}{n_c} s_0^{\frac{1}{2}} h_c^{\frac{5}{3}} = C_c h_c^{\alpha_c} \end{cases}, \quad (13)$$

де h_c – глибина води у руслі, r_c – бічний приплив до елемента, що формується внаслідок поверхневого стоку, s_0 – тангенс нахилу дна русла до координатної вісі x вважається рівним $\tan(\beta_i)$ для i -ого елемента русла, n_c – коефіцієнт шорсткості дна русла (коефіцієнт Маннінга), $\alpha_c = 5/3$ – параметр, що отримується з формули Маннінга.

Стік i -ого елемента русла дорівнює

$$Q_{c_i}^d = (r_{c_i} x w_i + q_{c_i}^u) - \frac{V_{c_i}(t_0 + T) - V_{c_i}(t_0)}{T}. \quad (14)$$

Таким чином, в результаті розв'язку рівнянь наведених вище модулів отримується стік з водозбору у замикаючому створі.

5. Вхідні дані моделі ТОПКАП-IPMMS

Вхідні дані моделі можна концептуально поділити на групи:

1. Параметри, що можуть бути задані одним значенням для всього водозбору.
2. ГІС-карти водозбору.
3. Метеорологічні дані.

В табл. 1 наведено перелік параметрів моделі та відповідні карти, з яких можна визначити їх значення для конкретного водозбору.

Слід зауважити, що на практиці завжди існує брак даних і необхідних ГІС-карт, отже, відповідні параметри можуть бути введені у модель дослідником у вигляді значен-

ня, яке є незмінним для всіх елементів водозбору, а вибір значення має базуватися на знаннях про гідрологічні, геологічні, географічні характеристики водозбору.

Метеорологічні дані беруться або з даних спостережень гідрометеорологічних станцій, або з сіток опадів на водозборі, розрахованих чисельними моделями прогнозу погоди.

Таблиця 1. Перелік параметрів моделі ТОПКАП-ІПММС

Позначення	Назва	Джерело	Діапазон значень
L	Глибина верхнього шару ґрунту	Карта ґрунтів	0,10 ~3,00 м
ϑ	Початковий вміст вологи у ґрунті	Задається дослідником	1%~100 %
k_s	Гідравлічна провідність ґрунту у стані насичення. Визначається з карти ґрунтів	Карта ґрунтів	$10^{-6} \sim 10^{-3}$ м/с
ϑ_r	Частка води у ґрунті, що є статична і не піддається силам гравітації та капілярного тиску	Карта ґрунтів	1%~10 %
ϑ_s	Максимально можливий вміст води у шарі ґрунту	Карта ґрунтів	25%~70%
α	Параметр, що залежить від типу ґрунту	Карта ґрунтів	2,0~4,0
n_o	Коефіцієнт шорсткості поверхні водозбору	Карта землекористування	0,05~0,20
n_c	Коефіцієнт шорсткості для русла річок та водотоків	Задається дослідником з огляду на гідроморфологічні особливості	0,02~0,08
A_{th}	Порогове значення площі для визначення, чи є елемент водозбору руслом річки, чи ні		0,0~1,0
w_{max}	Максимальна можлива ширина русла		до 1км
w_{min}	Мінімальна ширина русла		1 м і більше

6. Застосування моделі ТОПКАП-ІПММС для оцінки ефективності протипаводкових заходів

Об'єктом моделювання є водозбір, що знаходиться в межах селища Квасово (Берегівський район, Закарпатська область) (рис. 1). Селище розташовано на правому березі р. Боржава. Від річки воно відокремлено дамбою, побудованою з метою запобігання підтоплень з Боржави. З заходу селище оточено горами, діапазон зміни висот становить близько 30 метрів. З огляду на ці фактори, селище знаходиться в районі підвищеної паводкової небезпеки.

Для запобігання затоплень на території селища в 70-ті роки минулого сторіччя була побудована мережа дренажних каналів, що, згідно з проектом, мали перенаправляти у річку значну кількість поверхневого стоку з гір. Однак останні катастрофічні повені 1998 та 2001 року, що відбулися на Закарпатті, нанесли району дослідження великі збитки внаслідок підтоплень місцевим стоком з гірських схилів, підпору води з р. Боржава та засмічення дренажних і водовідвідних каналів у захисній дамбі. Зважаючи на ці події, повстало питання щодо аналізу існуючих і планування нових протипаводкових заходів. У рамках державної «Програми комплексного протипаводкового захисту в басейні р. Тиси у Закарпат-

ській області на 2002–2006 роки та прогноз до 2015 року» [17] було заплановано побудову нового дренажного каналу по периметру селища та пересувну насосну станцію, яка повинна відкачувати воду, що поступатиме під час повеней з гір у селище, у р. Боржаву, тим самим мінімізуючи можливі збитки. Оцінка ефективності нового каналу під час паводку, близького до паводку 1%-ної забезпеченості, та розрахунок об'ємів води, що можуть акумулюватися в долині селища, є основною метою дослідження.

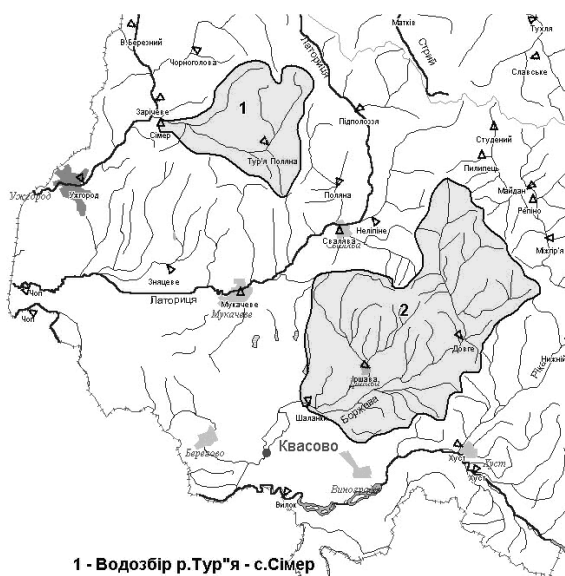
Для вирішення поставлених задач необхідно створити модель «опади-стік» для водозбору Квасово, що дозволить кількісно оцінити динаміку та об'єми поверхневого стоку з гір на територію села. Водозбір с. Квасово є не вивченим у гідрологічному плані, а саме відсутні будь-які дані спостережень за стоком води і, як наслідок, ускладнена ідентифікація параметрів гідрологічних моделей. Як було зазначено у вступі, у сучасній гідрологічній практиці для моделювання стоку з подібних водозборів використовуються фізично-обґрунтовані моделі.

Базуючись на тому, що параметри моделі ТОПКАПІ-ПММС є фізично-обґрунтованими, можна припустити, що їх значення суттєво не змінюються в межах малого регіону зі схожими фізично-географічними умовами. Отже, якщо отримати модель, яка у термінах співпадіння розрахованого та виміряного гідрографа адекватно описує гідрологічні процеси на водозборі, множину її параметрів можна застосовувати для побудови моделей територіально сусідніх водозборів.

Модель ТОПКАПІ-ПММС вже була апробована на Закарпатті [7, 18] для водозбору р. Тур'я із замикальним створом с. Сімер (Перечинський район, Закарпатська область) (рис. 1). Площа водозбору становить 464 км². Параметри моделі водозбору р. Сімер (табл. 2) було обрано як базові для створення моделі стоку в районі с. Квасово.

Таблиця 2. Параметри моделі водозбору р. Тур'я з замикаючим створом с. Сімер

L	ϑ	k_s	ϑ_r	ϑ_s	α	n_o	n_c	A_{th}	w_{max}	w_{min}
0,5 м	0,9	0,000037 м/с	0,027	0,463	2,5	0,08	0,02	0,08	15 м	2 м



1 - Водозбір р.Тур'я - с.Сімер
2 - Водозбір р.Боржава - с.Шаланки
Рис. 1. Розташування досліджуваних водозборів та с. Квасово

Для перевірки значень параметрів була побудована модель водозбору р. Боржава з замикаючим створом с. Шаланки (Виноградівський район, Закарпатська область) (рис. 1). Площа водозбору становить 1001 км². Цей водозбір є територіально найближчим до с. Квасово, для якого існують ряди спостережень за річковим стоком.

Моделювання проводилось для періоду катастрофічного паводку листопада 1998 року та періоду його формування. Даний паводок є близьким до паводку 1%-ної забезпеченості. Як вхідні метеорологічні умови використовувалися дані фактичних опадів, виміряних на гідрометеорологічних станціях і розташованих у межах досліджуваних водозборів. Цифрова модель рельєфу водозборів була взята з вільно розповсюджуваної світової карти висот GOTOPO30 (<http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html>), що являє собою растр з кроком 1 км.

Нижче наведено результати моделювання для двох водозборів (рис. 2, 3):

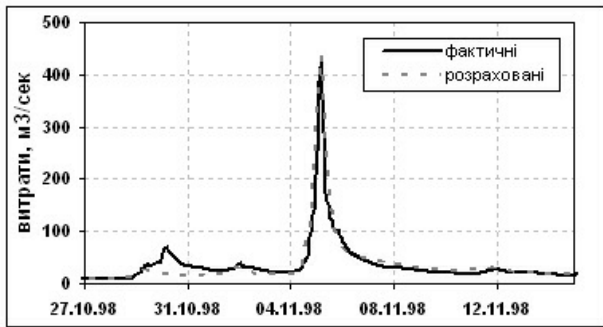


Рис. 2. Результати моделювання. Водозбір р. Тур'я, гідрологічний пост с. Сімер

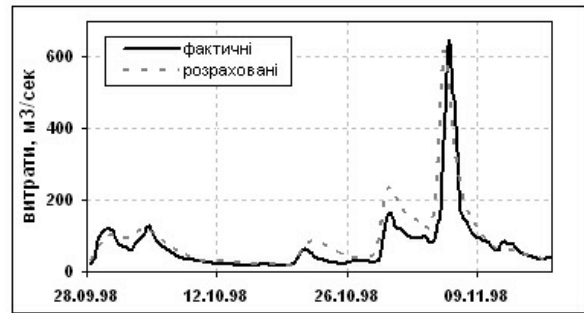


Рис. 3. Результати моделювання. Водозбір р. Боржава, гідрологічний пост с. Шаланки

Оцінка точності результатів моделювання проводилася у термінах середньої квадратичної похибки та процентного співвідношення водного балансу (табл. 3).

Таблиця 3. Похибки результатів моделювання

Водозбір	Середньоквадратична похибка	Співвідношення водного балансу, %
р. Тур'я, с. Сімер	0,95	92
р. Боржава, с. Шаланки	0,7	70

Отримані результати моделювання є задовільними, отриманий набір параметрів моделі адекватно описує процеси формування стоку на досліджуваних водозборах. Як наслідок, параметри моделі ТОРКАРІ-ІПММС, що були використані для моделювання цих двох водозборів, можуть бути використані для моделювання стоку на водозборі с. Квасово.

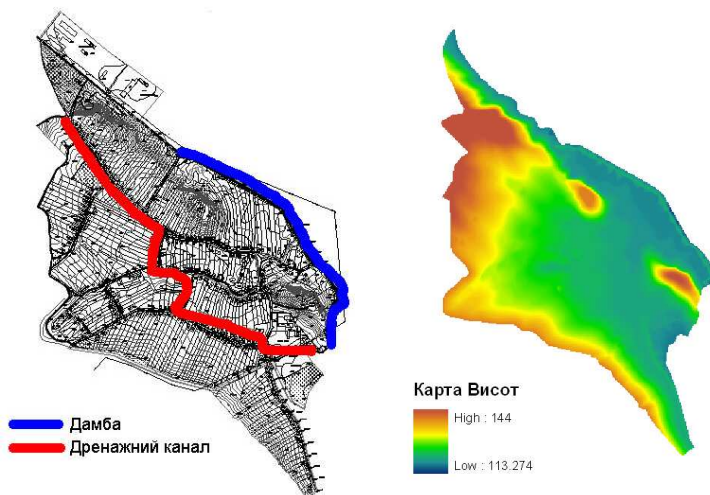


Рис. 4. Топографічна карта Квасово (зліва) та побудована цифрова модель рельєфу (справа)

- Топографічна карта з відмітками висот масштабом 1:2000, з якої засобами ГІС була побудована цифрова модель рельєфу водозбору з просторовим кроком 20 метрів (рис. 4).

- Топологія та конструктивні параметри запланованого дренажного каналу – ширина 2 метри та середня глибина 1 метр. Канал було введено в цифрову карту рельєфу таким чином, щоб він впливав на дерево стоку моделі.

Для водозбору с. Квасово 1998 рік був характерний трьома значними дощовими паводками, що сталися у червні, липні та листопаді, відповідно. Отже, було вирішено провести моделювання стоку за весь 1998 рік за двома сценаріями: з урахуванням запланованого дренажного каналу та реконструкцію історичної ситуації.

Для побудови моделі водозбору с. Квасово було використано такі вхідні дані:

- Метеорологічні дані (добові опади) за 1998 рік зафіксовані на найближчій до с. Квасово гідрометеорологічній станції Шаланки (рис. 5).
- Набір параметрів моделі ТОПКАПІ-ІПММС (табл. 2).

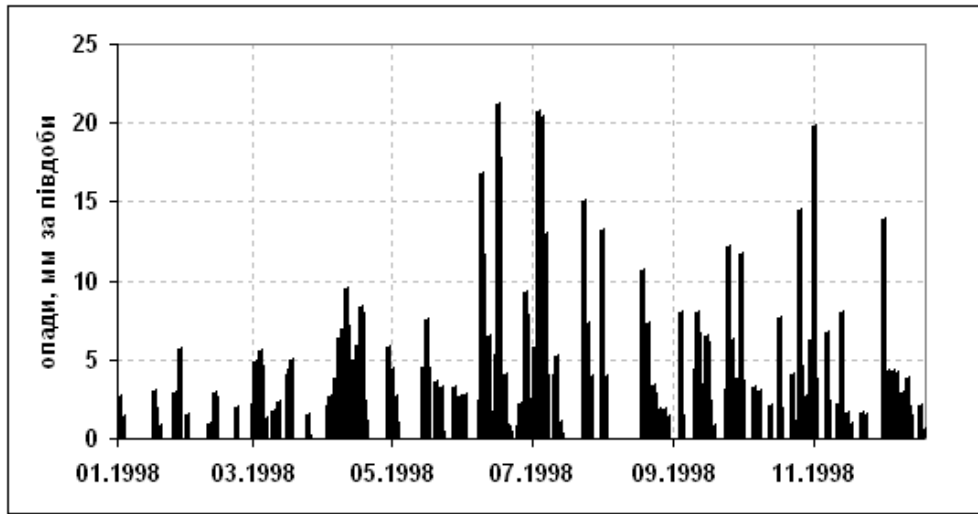


Рис. 5. Фактичні опади за 1998 год, метеорологічна станція Шаланки

У результаті моделювання отримано два гідрографи (рис. 6) – для випадку з побудованим дренажним каналом та без нього.

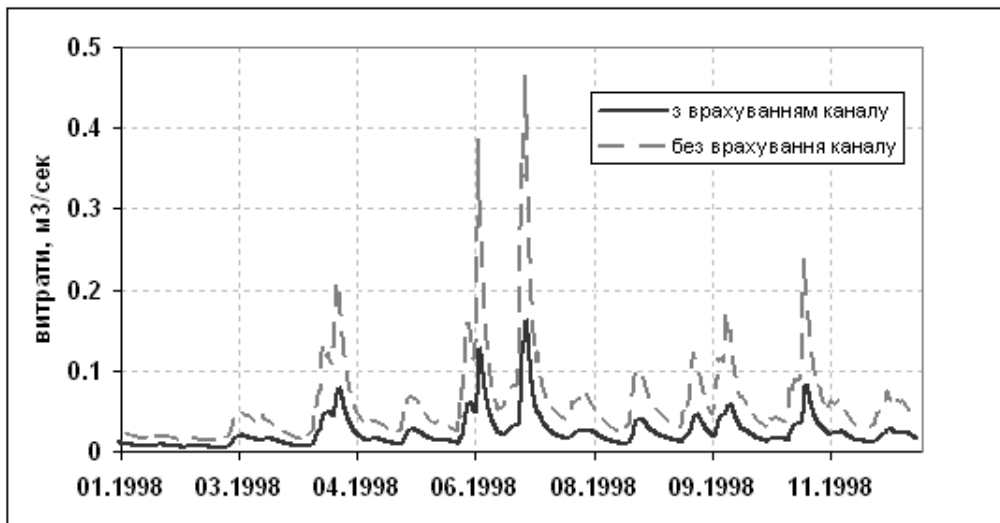


Рис. 6. Результати розрахунків стоку з водозбору с. Квасово за 1998 рік

Отримані результати дають можливість оцінити ефективність запланованого дренажного каналу. Так, показано, що канал дає можливість зменшити витрати води в долині селища приблизно в чотири рази. З результатів розрахунків можна побачити, що максимальний стік за 1998 рік відбувся 10.07.1998 і для двох сценаріїв дорівнює $0,175 \text{ м}^3/\text{с}$ і $0,475 \text{ м}^3/\text{с}$ відповідно. Об'єм води, який було закумульовано за одну годину в долині з урахуванням дренажного каналу, дорівнює 630 м^3 , а у разі неробочого стану (або відсутності) дренажного каналу – 1710 м^3 .

7. Висновки

Розроблена програмна реалізація розподіленої фізично-обґрунтованої моделі «опад-стік» ТОРКАРІ-ІПММС була застосована для моделювання паводкового стоку та аналізу ефек-

тивності протипаводкових заходів для малого гірського водозбору с. Квасово (Закарпатська обл.), який є не вивченим у гідрологічному плані. Обґрунтовано параметри моделі, які адекватно описують процеси формування дощового стоку на досліджуваній території. Достовірність отриманих параметрів підтверджується залученням даних фактичних гідрометеорологічних спостережень та відомостей про характер підстильної поверхні річкових басейнів. Похибки результатів моделювання є задовільними, що дозволяє рекомендувати отриману модель для практичних робіт у руслах річок та на їх водозборах. Результати розрахунків було використано для прийняття рішення про побудову дренажного каналу в с. Квасово та оцінки необхідних потужностей насосної станції.

Отримані результати показують широку можливість використання сучасних розподілених моделей формування річкового стоку в поєднанні з ГІС-інформацією для проектування та аналізу протипаводкових заходів. Розроблена розподілена модель «опаді-стік» ТОРКАРІ-ІММС може бути застосована також для детальної реконструкції минулих паводків, аналізу їх параметрів поза межами регулярних пунктів гідрометеорологічних вимірювань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Singh V.P. Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications / Singh V.P. – Highlands Ranch, CO., 1995. – 1130 p.
2. Соседко М.Н. Применение математической модели формирования дождевого стока с распределенными параметрами при краткосрочном прогнозировании паводков в горных районах / М.Н. Соседко, О.И. Лукьянец // Тр. УкрНИГМИ. – 1993. – Вып. 245. – С. 29 – 39.
3. Кюнж Ж.А. Численные методы в задачах речной гидравлики / Кюнж Ж.А., Холли Ф.М., Вервей А. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 252 с.
4. Wooding R.A. A hydraulic modeling of the catchment-stream problem. 1. Kinematic wave theory / R.A. Wooding // Journal of Hydrology. – 1965. – N 3. – P. 254 – 267.
5. Vieux B.E. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS / B.E. Vieux // Series: Water Science and Technology Library. – 2004. – Vol. 48. – 289 p.
6. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока / Кучмент Л.С. – Л.: Гидрометеориздат, 1980. – 143 с.
7. Boyko O. Application of a physically-based distributed rainfall-runoff model TOPKAPI-IMMSP to gauged and ungauged mountainous catchments of Transcarpathian region, Ukraine / O. Boyko, D. Treebushny // Geophysical Research Abstracts. – 2006. – Vol. 8. – P. 07964.
8. An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen / M.B. Abbott, J.C., Bathurst, J.A. Cunge [et al.] // "SHE". 1 History and philosophy of a physically based distributed modelling system, Journal of Hydrology. – 1986. – N 87. – P. 45 – 59.
9. Topmodel / K. Beven, R. Lamb, P. Quinn [et al.] // Computer Models of Watershed Hydrology / V.P. Singh (ed.). – Colorado: Water Resources Publications, 1995. – P. 627 – 668.
10. Todini E. The TOPKAPI model / E. Todini, L. Ciarapica // Mathematical Models of Large Watershed Hydrology / V.P. Singh [et al.] (ed.). – Colorado: Water Resources Publications, Littleton, 2001. – Chapter 12. – P. 471 – 504.
11. Иванов В.А. Адаптация гидравлической модели водостока к бассейнам рек Дунай и Днестр / В.А. Иванов, А.В. Прусов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – С. 392 – 407.
12. Cash J.R. A variable order Runge-Kutta method for initial value problems with rapidly varying right hand sides / J.R. Cash, A.H. Karp // ACM Transactions on Mathematical Software. – 1990. – N 16 (3). – P. 201 – 222.
13. Dunne T. Field studies of hillslope flow process / T. Dunne // Hillslope Hydrology / M.J. Kirkby (ed.). – Wiley, New York, 1978. – P. 227 – 293.
14. Liu Z.L. The TOPKAPI model, Hydrology and Earth System Sciences 6 / Z.L. Liu, E. Todini. – Wiley, New York, 2002. – P. 859 – 881.

15. Todini E. New trends in modelling soil processes from hillslope to GCM scales / Todini E. // The Role of Water and the Hydrological Cycle in Global Change / H.R. Oliver, S.A. Oliver (eds). nato asi Series. – Series I: Global Environmental Change. – 1995. – N 31. – P. 317 – 347.
16. Brooks R.H. Hydraulic properties of porous media / R.H. Brooks, A.T. Corey. – Hydrol. Pap. 3. Colo. State Univ., Fort Collins, 1978. – 27 p.
17. Програма комплексного протишаводкового захисту в басейні річки Тиса в Закарпатській області на 2002–2006 р. та прогноз до 2015 р. Програма затверджена постановою КМУ від 24.10.01 № 1388.
18. Моделирование шаводочного стока в украинской части бассейна реки Тиса на основе моделей с распределенными и сосредоточенными параметрами / А. Бойко, М. Железняк, Д. Трибушный [и др.] // Сб. трудов конф. «Моделирование -2006». – Киев: Институт проблем моделирования в энергетике НАН Украины, 2006. – С. 115 – 120.

Стаття надійшла до редакції 22.06.2011