

## УЗАГАЛЬНЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ ДОЩОВОГО СТОКУ НА ПРИКЛАДІ МАЛИХ ВОДОЗБОРІВ БАСЕЙНУ ДНІСТРА

**Приймаченко Н.В.**

*Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут,  
м. Київ*

**Ключові слова:** *математичне моделювання, ландшафтні умови, залежність параметрів*

**Актуальність теми дослідження.** Методи розрахунку максимальних витрат і об'ємів паводків певної ймовірності перевищення постають як розрахунок гідрографів цих паводків. За наявності гідрографів є можливість оцінити всі характеристики стоку води.

Методичні підходи, що застосовуються на практиці при проектуванні водогосподарських споруд, у тому числі й згідно з рекомендаціями СНиП 2.01.14-83, не позбавлені недоліків. Найперше, що ці методики базуються лише на використанні результатів гідрологічних спостережень, тобто даних про стік води. Таким чином оцінки гідрологічних характеристик зводяться до їх інтерполяції тим чи іншим способом між суміжними водозборами чи шляхом обчислення за аналогією. В наш час існує нагальна потреба більш точного визначення залежностей стокових характеристик від фізико-географічних умов формування паводків, чому й присвячена дана робота.

**Аналіз попередніх досліджень.** Вивчення умов формування паводків в залежності від природних факторів і розробкою рекомендацій по вивченню їх характеристик (як для вивчених так і для невивчених територій) проводилось вченими УкрНДГМІ – Сусідко М.М., Лук'янець О.І., Масловою Т.В.. В багатьох дослідженнях великої уваги приділено вирішенню цих проблем, ряд отриманих характеристик доведений до практичного використання [ 1-5, 7, 11, 12 ].

**Мета проведених досліджень.** Визначення чітких залежностей параметрів математичної моделі формування стоку від ландшафтних особливостей високогірних водозборів басейну Дністра.

**Методика досліджень.** Досвід математичного моделювання процесів формування дощового стоку, критичний аналіз стокових даних на основі нових досліджень цих процесів створили передумови для розроблення методичних засад, які більш повно відповідають можливостям розрахунку для невивчених у гідрологічному відношенні водозборів.

Для обчислення стоку дощових паводків досить поширено застосування регіональних формул. При цьому в основі рекомендацій із визначення максимальних витрат води застосовується залежність модуля стоку від площі водозбору. Ця залежність відображає зменшення значення

модуля зі збільшенням площі річкового басейну, тобто його редукція. Хоча перевірка точності співпадіння розрахованих максимальних витрат з фактичними даними показує добру відповідність, це не є достатньою оцінкою редукційного методу, оскільки враховуються лише характеристики на поблизу розташованих водозборах, отримані статистичним методом. Тим самим обмежені можливості застосування цього методу для невивчених водозборів.

Більш широке застосування оцінки гідрологічних характеристик можливе лише на основі математичного моделювання процесів формування дощового стоку. Нижче описана методика оцінювання максимальних витрат води і об'ємів стоку на гірських водозборах на таких засадах. Вона включає для моделювання гідрографа паводка заданої ймовірності перевищення три комплекси показників, які відносяться до певного водозбору:

- кількість опадів заданої ймовірності перевищення,
- розподіл опадів по розрахунковим проміжкам часу,
- параметри математичної моделі формування дощового паводку.

**Виклад основного матеріалу.** *Значущість процесів формування дощового стоку на гірських водозборах.* При створенні методики необхідно визначити необхідну точність оцінки параметрів моделі і звернути увагу на більш детальне дослідження тих процесів стоку, які є визначальними при різних гідрометеорологічних ситуаціях, що складаються на водозборі. Вирішення такої задачі здійснено шляхом чисельних експериментів на фактичних даних спостережень.

Застосування математичного моделювання в практичній гідрології висуває ряд проблем. Однією з них, як відомо, є оцінювання параметрів моделей. При цьому важливо не тільки досягнення прийняттого кінцевого результату, тобто одержання розрахованих гідрографів, близьких до спостережених, але й встановлення достовірних, фізично обґрунтованих значень параметрів. Через відсутність ряду важливих даних про будову водозбору при моделюванні перебігу стоку водозбір доводиться розглядати як систему, окремі властивості якої відомі лише приблизно. Ця обставина, а також неточність просторових значень вхідної гідрометеорологічної інформації змушують дослідника застосовувати для ідентифікації параметрів моделі стоку оптимізаційні процедури, що може привести до одержання неоднозначних рішень.

Важливо при цьому мати уявлення про відносну значущість окремих процесів у формуванні стоку води, а тим самим приділяти увагу точності оцінювання відповідних модельних параметрів. Таке питання розглянуто на прикладі математичної моделі формування дощового стоку, яка застосовується в басейнових прогностичних системах Карпатського регіону [6, 8, 10] шляхом чисельних експериментів на даних фактичних спостережень.

Відповідно до засад математичної моделі формування дощового стоку - перебіг стоку води в замикальному створі водозбору  $Q(t)$  визначається

чотирма складовими – поверхневим  $Q_1(t)$ , підповерхневим  $Q_2(t)$ , підґрунтовим  $Q_3(t)$  водоутвореннями та виснаженням  $Q_R(t)$  запасів води, які накопичилися в річковій мережі до початку розрахункового періоду (за  $t = 0$ ):

$$Q(t) = Q_1(t) + Q_2(t) + Q_3(t) + Q_R(t). \quad (1)$$

Питома вага цих складових залежить від інтенсивності опадів під час дощових паводків, змінюючись у значних межах. Це особливо помітно при порівнянні об'ємів поверхневого та підповерхневого стоку (табл. 1).

**Таблиця 1. Частка видів стоку за дощових паводків різної висоти**

Види стоку	Питома вага стоку (%) при паводках відповідної ймовірності		
	Високі (2-5%)	Середні (20-30%)	Низькі (40-60%)
Поверхневий	60	24	6
Підповерхневий	38	75	84
Підґрунтовий	2	1	10

*Вагомість процесів формування дощового стоку.* Розглядається вплив лише тих параметрів, що визначають процеси водоутворення і втрати дощової води, тобто входять у воднобалансові співвідношення. У даному випадку немає потреби аналізувати неточності розрахунку ходу стоку, що виникають за рахунок зміни параметрів функцій впливу, оскільки встановлення останніх є досить простим рішенням, що не представляє якої-небудь складності в методичному і практичному плані.

Зміна параметрів  $K_1$  і  $K_2$ , закладених у рівнянні для розрахунку випаровування з поверхні водозбору, у загальному несуттєво впливає на точність розрахунку гідрографа - середні погрішності складають 4-5% при низьких і 1-1,5% при високих паводках. Це пов'язано з тим, що в умовах Карпат паводкоутворюючі дощі обумовлені переміщенням фронтальних розділів. У ці періоди дощі охоплюють велику територію, інтенсивність їх висока, спостерігаються порівняно низькі температури повітря, висока вологість повітря, і випар знижується до 0,1–0,2 мм/добу. Неточність задання цих параметрів може позначатися на початку паводка за рахунок похибок у розрахунку попереднього зволоження водозбору.

Параметри  $K_3$  і  $W_m$  входять у вирази моделі для розрахунку дефіциту вологості ґрунту, інтенсивності інфільтрації, підповерхневого водоутворення, затримки вологи в ґрунті. Відношенням цих параметрів ( $W_m / K_3$ ) визначається максимальна інтенсивність підповерхневого водоутворення. Значення  $W_m / K_3$  на карпатських водозборах досягає 4-5 мм/3 години. Отже, похибки в завданні цих параметрів помітно впливають на точність розрахунку стоку.

При заниженні значення  $K_3$  більше води приходиться на інфільтрацію і поповнення запасів вологи в ґрунті. У результаті такого завищення інтенсивності підповерхневого і зниження поверхневого стоку розраховані

витрати води виявляються більш низькими на підйомі і піку паводка, тоді як на спаді відбувається більш високий стік відносно фактичного.

Якщо ж значення коефіцієнта  $K_3$  завищене в порівнянні з оптимальним, то при розрахунку зменшується інтенсивність інфільтрації і відповідно збільшується частка поверхневого стоку. На величину підповерхневого стоку така зміна  $K_3$  впливає подвійно. Його розрахункова інтенсивність у більшості випадків зменшується, однак при відсутності поверхневого стоку може відбуватися також і збільшення за рахунок зниження витрат на поповнення запасів ґрунтової вологи.

Параметр  $W_m$  є характеристикою максимально можливих запасів води в підповерхневому шарі. При його заниженні зменшуються розраховані величини інтенсивності інфільтрації і підповерхневого стоку. Така зміна позначається на співвідношенні величин поверхневого і підповерхневого стоку по-різному і залежить від рівня поля опадів. При інтенсивних опадах відбувається перерозподіл водоутворення у бік збільшення розрахованих величин поверхневого стоку за рахунок зменшення підповерхневого. При помірній і слабкій інтенсивності опадів інтенсивність підповерхневого стоку збільшується, тому що зменшуються втрати на поповнення запасів вологи в ґрунті. Завищення параметра  $W_m$  приводить до зворотної картини, у результаті чого перебільшується обсяг води на поповнення запасів ґрунтової вологи. Розрахований гідрограф спотворюється в першому випадку за рахунок завищення пікової частини, а в другому - у період спаду.

Зміна параметра  $K_5$ , що визначає інтенсивність виснаження запасів води з водозбору й у такий спосіб його зволоженість, відбивається в основному на величині підповерхневого стоку. При заниженні  $K_5$  процес виснаження сповільнюється, зволоженість більш тривалий час підтримується на високому рівні, збільшується розрахункова інтенсивність підповерхневого стоку, а відповідно і загального стоку. Оскільки розрахункова інтенсивність поверхневого стоку слабо змінюється, вплив параметра  $K_5$  більш відчутно під час паводків середньої і низької висоти (похибки розрахунку стоку до 10-22%).

Вплив зміни коефіцієнту фільтрації  $i_0$  позначається на точності розрахунку гідрографів низьких паводків, коли ґрунтовий стік має більш значну питому вагу в загальному обсязі. Відносні погрішності розрахунку можуть досягати при цьому 6-8%.

Інтенсивність виснаження запасів води, що знаходяться в русловій мережі басейну до початку розрахункового періоду, визначається параметром виснаження  $R$ . Ступінь впливу його зміни на точність розрахунку гідрографа залежить від величини початкових витрат води, а відносні погрішності визначаються також висотою паводка.

Вплив зміни показників діючої площі водозбору  $\eta$  і  $m$  на точність розрахунку гідрографа залежить від питомої ваги поверхневого стоку в загальному обсязі паводка. Природно, що цей вплив незначний при

низьких паводках. У наших експериментах для середніх і високих паводків відносні погрішності розрахунку гідрографа за рахунок зміни  $\eta$  і  $m$  досягали 20-38%. Обидва параметри визначають втрати води на поверхневе затримання, тому їхній вплив на кінцевий результат розрахунку знаходиться в прямій залежності від величини параметрів. У такий спосіб найбільш значно впливають (за винятком функцій впливу) на точність розрахунку гідрографа параметри  $K_3$ ,  $W_m$  і  $\eta$ .

*Аналіз чутливості моделі.* Як свідчить аналіз чутливості моделі та її складових, відповідно до її структури та взаємозв'язку воднобалансових рішень, найбільш істотний вплив на кінцеві результати чинять функції впливу та параметри  $K_3$ ,  $W_m$ ,  $\eta$ . Від їхніх значень залежить інтенсивність основних втрат, розподіл стоку на поверхневу і підповерхневу складові та природній регулюючий вплив водозбору.

Параметри,  $W_m$  і  $K_3$  визначають максимально можливу інтенсивність підповерхневого водоутворення, яка залежить від стану й особливостей водозбору, головним чином від пухкоуламкових відкладів і залісеності. Товщина пухкоуламкових відкладів переважно зменшується з висотою місцевості. Зі збільшенням залісеності водозбору понад 30-35 % підвищується значення  $W_m/K_3$ . Розрахунки шляхом моделювання та водобалансові оцінки показали, що на карпатських водозборах значення  $W_m/K_3$  варіює в межах 4-5 мм/3 години.

Оцінювання оптимальних параметрів математичної моделі формування дощового стоку для малих водозборів басейна Дністра здійснювалося за гідрометеорологічними даними, що охоплюють паводки різної висоти, із застосуванням технології, яка базується на методі декомпозиції [9].

Узагальнення параметрів моделі має на меті використання її для розрахунку гідрографів стоку з водозборів, не вивчених у гідрологічному відношенні. При цьому врахована значущість параметрів моделі.

Залежність параметра  $W_m$  від висоти місцевості та залісеності зображено на рис. 1. В аналітичному вигляді вона подається так:

$$W_m = \begin{cases} 50,2 - 0,0072H, & f_{л} \leq 30 \\ 55,0 - 0,0072H - 0,16f_{л}, & 30 < f_{л} \leq 75 \\ 42,9 - 0,0072H, & f_{л} > 75 \end{cases} \quad (2)$$

де:  $H$  – середня висота водозбору, м абс.,  $f_{л}$  – залісеність водозбору, %.

Параметр  $K_3$  подається також в залежності від висоти й залісеності водозбору:

$$K_3 = \begin{cases} 7,53 - 0,0002H, & f_{л} \leq 30 \\ 8,25 - 0,0002H - 0,024f_{л}, & 30 < f_{л} \leq 75 \\ 6,44 - 0,0002H, & f_{л} > 75 \end{cases} \quad (3)$$

Параметр кривої виснаження підповерхневого й підґрунтового стоку  $R$  залежить від площі водозбору  $F$  (за 3-годинний проміжок часу):



$$R = \begin{cases} 0,00015 F + 0,825, & F \leq 800 \\ 0,98, & F > 800 \end{cases} \quad (4)$$

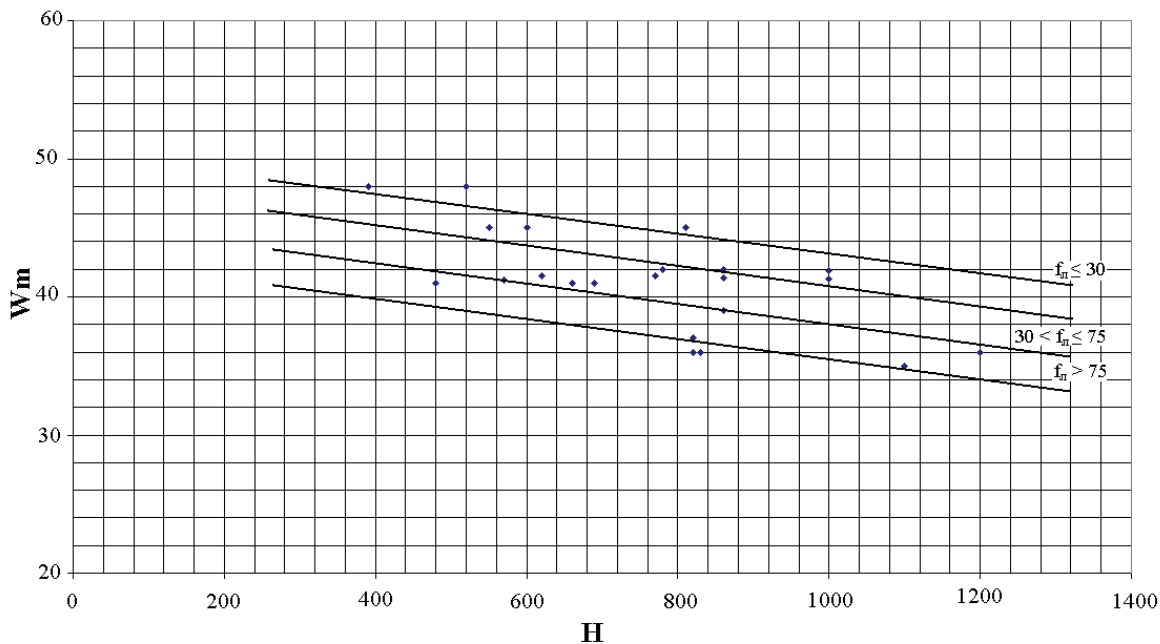


Рис. 1. Залежність параметра  $W_m$  від висоти місцевості та залісеності

Параметр  $\eta$  визначає відносну величину діючої площі водозбору і таким чином втрачає воду на поверхневе затримання. Значення цього параметра погоджується з коефіцієнтами стоку під час інтенсивних дощів. За наших розрахунків його оптимальне значення змінювалося в межах 0,50 – 0,90. При обчисленні дощового стоку з гірських водозборів басейну Дністра рекомендується використовувати залежність параметра  $\eta$  від середнього похилу водозбору  $I$  (м/км). Таким чином,

$$\eta = \begin{cases} 0,45 + 0,0015 I, & I < 300 \\ 0,90, & I \geq 300 \end{cases} \quad (5)$$

Форма функцій впливу визначається гідравлічними умовами переміщення водних мас по поверхні водозбору та в русловій мережі. У моделі Доц-3 функції впливу подані гама-розподілом з параметрами  $\tau_1$ ,  $n_1$  (для поверхневого стоку) і  $\tau_2$ ,  $n_2$  (для підповерхневого).

Аналіз зв'язку цих параметрів з морфометричними характеристиками показав залежність їх від площі водозбору  $F$ , його середнього похилу  $I$  (рис. 2) та середнього похилу річки  $I_p$  (м/км). Аналітичні вирази цих залежностей:

$$\tau_1 = \begin{cases} 1,58 - 0,018 I_p, & I_p > 7,0 \\ 4,25 - 0,40 I_p, & I_p \leq 7,0; \end{cases} \quad (6)$$

$$\tau_2 = \begin{cases} 4,34 - 0,02 I_p, & I_p > 7,0 \\ 7,00 - 0,40 I_p, & I_p \leq 7,0; \end{cases} \quad (7)$$

$$n_1 = \begin{cases} 0,0020F + 2,58, & I \leq 100 \\ 0,0020F - 0,017I + 4,28, & 100 < I < 200; \\ 0,0020F + 0,88, & I \geq 200 \end{cases} \quad (8)$$

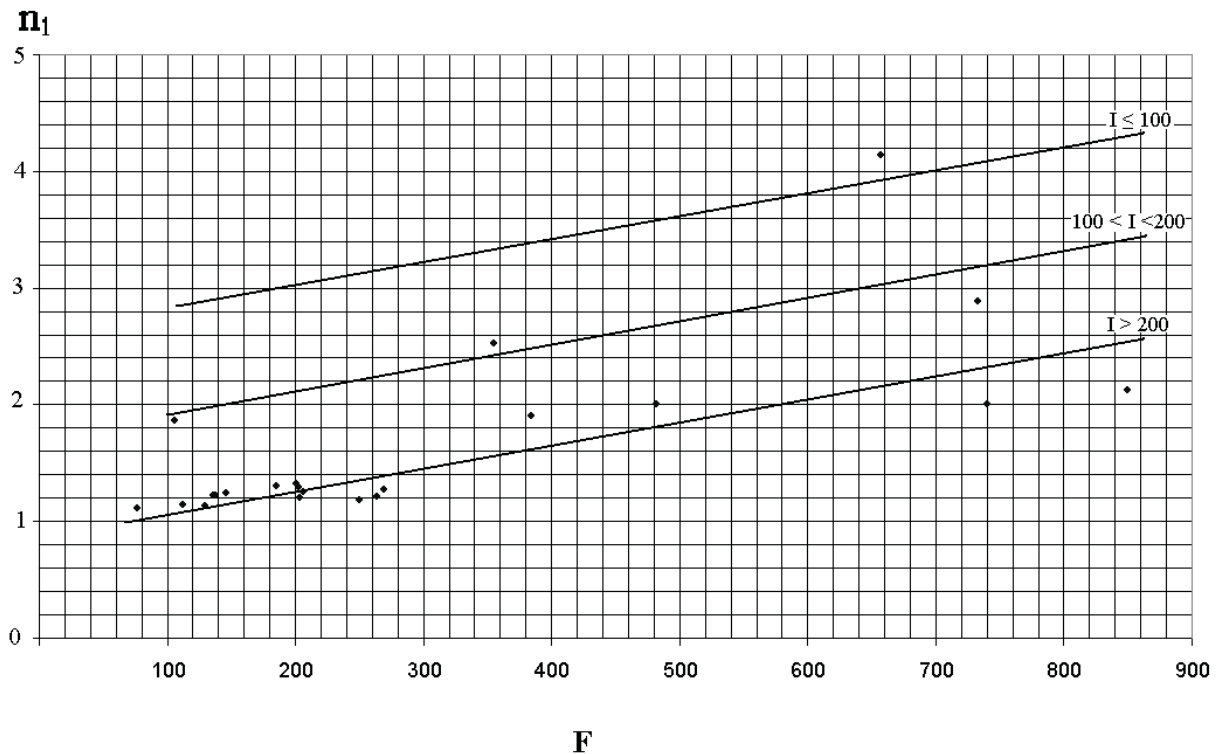


Рис. 2. Аналіз зв'язку функції впливу з морфометричними характеристиками (площею водозбору F, середнім похилом водозбору I)

$$n_2 = \begin{cases} 2,5n_1, & I \leq 100 \\ 2,7n_2, & I > 100. \end{cases} \quad (9)$$

Оцінки параметрів  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_4$ ,  $K_5$  і  $m$  визначені як середні значення, отримані шляхом моделювання дощових паводків різної висоти.

У таблиці 2 подані узагальнені параметри моделі формування дощового стоку та посилання на їх аналітичні вирази в залежності від ландшафтних особливостей гірських водозборів.

**Висновки.** Отримані результати дозволяють говорити, що найбільш значно впливають (за винятком функцій впливу) на точність розрахунку гідрографа параметри  $K_3$ ,  $W_m$  і  $\eta$ . Від їхньої величини залежить інтенсивність основних видів втрат, розподіл стоку на поверхневу і

Таблиця 2. Узагальнені параметри моделі формування дощового стоку

Параметри	Значення параметрів
$K_1, \text{мм} \cdot \text{гПа}^{-1}$	0,024
$K_2, \text{мм} \cdot \text{гПа}^{-1}$	0,009
$K_3$	Згідно з (3)
$K_4, \text{мм}^{-1}$	0,05
$K_5, \text{мм}^{-1}$	0,08
$W_m, \text{мм}$	Згідно з (2)
$i_0, \text{мм}$	0,15
$R$	Згідно з (4)
$\eta$	Згідно з (5)
$m$	0,050
$\tau_1$	Згідно з (6)
$\tau_2$	Згідно з (7)
$n_1$	Згідно з (8)
$n_2$	Згідно з (8 і 9)

підповерхневу складову. Найбільш істотний вплив на кінцеві результати робить точність поділу водоутворення по видах стоку й облік втрат на поверхневу затримку води. Однак при описі цих процесів виникають труднощі через відсутність досить переконливої апріорної інформації для завдання відповідних параметрів. Інші параметри моделі, що визначають інтенсивність випаровування, фільтрації, виснаження накопичених запасів води в річковій мережі і регулюючий вплив водозбору, можуть бути встановлені з достатнім ступенем точності на основі наявних даних гідрометеорологічних спостережень. Шляхом чисельних експериментів проведено узагальнення параметрів математичної моделі формування дощового стоку на прикладі малих водозборів басейну Дністра. Отримані кількісні оцінки похибок обчислення гідрографів дощових паводків дають уявлення про значущість окремих параметрів моделі та процесів формування стоку води, які в ній описані. Визначено чіткі залежності параметрів моделі від фізико-географічних умов. В результаті узагальнення параметрів моделі відкриваються нові можливості для використання її при розрахунках гідрографів стоку з водозборів, не вивчених у гідрологічному відношенні.

#### Список літератури

1. Бышовец Л.Б. Русловая емкость малых рек Карпат и учет ее влияния на паводочный сток / Л.Б. Бышовец // Тр. УкрНИГМИ. – 1967. – Вып.69. – С. 94-104.
2. Лук'янець О.І. Ландшафтні характеристики як основа оцінювання параметрів математичних моделей формування стоку води / О.І. Лук'янець // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2003. - №5. – С. 78-84.
3. Нежиховский Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды / Р.А. Нежиховский. – Л. : Гидрометеоздат, 1960. – 290 с.
4. Приймаченко Н.В. Значущість процесів формування дощового стоку на гірських водозборах. / Н.В. Приймаченко // Наук.праці УкрНДГМІ – 2006. – Вип.255 – 327 с.
5. Соседко М.Н. Анализ точности определения параметров кривых истощения и русловых объёмов по ветви спада гидрографа /М.Н. Соседко // Тр. УкрНИГМИ. – 1977. – Вып. 140. – С.79-96.
6. Соседко М.Н. Анализ чувствительности математической модели формирования дождевого стока на горном водозборе / М.Н.



Соседко // Тр. УкрНИИ Госкомгидромета – 1986 – Вып. 212. – С. 85-93. **7.** Соседко М.Н. Зависимость характеристик максимальных расходов воды дождевых паводков в бассейне Днестра от ландшафтных русловий / М.Н. Соседко // Тр. УкрНИГМИ. – 1973. – Вып.123. – С. 100-118. **8.** Сусідко М.М. Математичне моделювання процесів формування стоку як основа прогностичних систем / М.М. Сусідко // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2000. – Т.1. – С.32-40. **9.** Соседко М.Н. Особенности применения метода декомпозиции при идентификации системы формирования стока / М.Н. Соседко // Тр. УкрНИГМИ. – 1988. – Вып.231. – С.3-13. **10.** Соседко М.Н. Порядок оптимизации параметров математической модели формирования дождевого стока, применяемой в условиях горной местности / М.Н. Соседко // Тр. УкрНИГМИ. – 1980. – Вып. 183. – С. 15-21. **11.** Pryimachenko N. The analysis of the sensitivity of a rain runoff formation processes on the mountain catchments / Natalia Pryimachenko // XXIII<sup>rd</sup> Conference of Danubian countries on the Hydrological forecasting and hydrological bases of water management: (Belgrade, Serbia, 28 -31 August 2006). – Beograd, 2006. **12.** Sossedko M.N. Anwendung des mathematischen Modells mit verteilten Parametern zur Formierung des Regenabflusses bei der kurzfristigen Vorhersagen des Hochwassers/ Sossedko M.N., Maslowa T.W., Luk'janetz O.I. // XV. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen. – Sofia, 1991. – S. 126-131.

#### **Узагальнення параметрів математичної моделі формування дощового стоку на прикладі малих водозборів басейну Дністра**

**Приймаченко Н.В.**

*Шляхом чисельних експериментів проведено узагальнення параметрів математичної моделі формування дощового стоку на прикладі малих водозборів басейну Дністра. Отримані кількісні оцінки похибки обчислення гідрографії дощових паводків дають уявлення про значення окремих параметрів моделі і процесів формування стоку води, що в ній описані. В результаті узагальнення параметрів моделі надає нових можливостей для використання її при розрахунках гідрографів стоку з водозборів, гідрологічно не вивчених.*

#### **Обобщение параметров математической модели формирования дождевого стока на примере малых водосборов бассейна Днестра**

**Приймаченко Н.В.**

*Путем численных экспериментов проведено обобщение параметров математической модели формирования дождевого стока на примере малых водосборов бассейна Днестра. Получены количественные оценки погрешностей вычисления гидрографии дождевых паводков дают представление о значимости отдельных параметров модели и процессов формирования стока воды, которые в ней описаны. В результате обобщения параметров модели открываются новые возможности для использования ее при расчетах гидрографов стока с водосборов, не изученных в гидрологическом отношении.*

#### **Generalisation of parametres of mathematical model of formation of a rain drain on an example of small reservoirs of Dnestr's basin**

**Pryimachenko N.V.**

*By numerical experiments generalisation of parametres of mathematical model of formation of a rain drain on an example of small reservoirs of Dnestr's basin is spent. Results of an estimation of errors of calculation of hydrographers of rain high waters are received give representation about the importance of separate parametres of model and processes of formation of a drain of water which in it are described. Accurate dependences of parametres on physico-geographical conditions are defined. As a result of generalisation of parametres of model new possibilities for its use open at calculations of hydrographers of a drain from the reservoirs which have been not investigated in the hydrological relation.*