

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОЦЕСІВ ВІНОСУ
РОЗЧИНЕНИХ ХІМІЧНИХ
РЕЧОВИН З МАЛИХ ВОДОЗБОРІВ**

М.Е. Даус, М.В. Захарова

Одеський державний екологічний
університет

м. Одеса, вул. Львівська, 15

E-mail: gideko@ogmi.farlep.odessa.ua

У статті наводиться опис процесів схилового стоку води та виносу розчинених хімічних речовин з експериментальних водозборів Закарпатської воднобалансової станції методами математичного моделювання.

Вступ. Однією з найбільш значних складових зовнішнього навантаження на водні об'єкти є винос хімічних речовин з різноманітних типів підстильної поверхні водозбірної території під дією дощових і талих вод. Подібне надходження хімічних елементів до річок і водойм називається розсередженим (просторовим), або дифузним, навантаженням. На відміну від навантаження точковими джерелами забруднення (скиди промислових, сільськогосподарських та побутових підприємств) розсереджене навантаження в значному ступені визначається характеристиками підстильної поверхні та гідрометеорологічними чинниками.

В залежності від походження джерела навантаження можуть класифікуватися як природні або антропогенні. Основним джерелом формування природного навантаження є винос хімічних речовин з природних ландшафтів (лісів, боліт, луків природного походження та ін.) під дією дощового та талого стоків. Антропогенна складова – це скид стічних вод промислових, сільськогосподарських та побутових підприємств, а також винесення розчинених і завислих домішок з сільськогосподарських угідь, пасовищ і рілля.

Формування виносу хімічних речовин з водозбірної території та розсереджене навантаження на водні об'єкти визначається вмістом речовин в ґрунтах, що складають водозбір, емісією речовини в водні об'єкти під дією дощових і

талих вод, а також утриманням речовини в гідрографічній мережі. Аналіз результатів експериментальних досліджень показав, що для більшості водойм основний внесок у зовнішнє навантаження вносить надходження завислих та розчинених у воді речовин з водозбору. Тому модель процесів стоку та виносу речовин з водозборів є основою будь-якої моделі формування навантаження на водойму, а також моделі системи водозбір-водойма [1].

Дослідженню розсередженого навантаження на різноманітних водозборах та типах підстильної поверхні присвячено багато досліджень, виконаних як вітчизняними, так і іноземними вченими. До числа найбільш відомих моделей поверхневого виносу забруднювальних речовин можна віднести такі: ARM (Agricultural Runoff Model), яка була розроблена для оцінки впливу неточкових (просторових) джерел забруднення на екологічні системи; CREAMS (A field-scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems), яка дозволяє розраховувати стік води і наносів, а також винесення хімічних речовин з невеликих сільськогосподарських водозборів [2, 3]. Відомі також моделі: EUROSEM, AGNPS, KINEROS, ANSWERS, GLEAMS, MIKE, SHETRAN та ін. [4 та ін.]. В Інституті озераведення РАН була розроблена система математичних моделей ILCM (Institute of Limnology Catchment Modeling System), яка розраховує стік води, транспортування наносів і змив забруднювальних речовин з водозборів річок [1].

Метою статті є математичне моделювання процесів формування розсередженого навантаження за рахунок виносу розчинених домішок з малих експериментальних водозборів Закарпатської воднобалансової станції (ЗВБС).

Матеріали і методи дослідження. При вирішенні наукових і прикладних задач водозбір розглядається як одно з джерел забруднення водних об'єктів, тому в рамках моделі водозбору повинні описуватися процеси формування рідкого, твердого і хімічного стоків. У сучасний період найбільш розробленими є гідрологічні моделі формування стоку

води (моделі водного режиму), які окрім самостійного значення слугують базою для побудови моделей водної ерозії, стоку наносів, виносу розчинених і адсорбованих хімічних речовин [1, 5].

Побудова будь-якої математичної моделі пов'язана із спрощеною формалізацією умов протікання реальних природних процесів за рахунок виділення основних аспектів і знехтування другорядними чинниками. Основними чинниками, що визначають структуру кожної моделі, є: вимоги задачі, характеристики об'єкта дослідження і процесів, що вивчаються, а також наявність і склад вхідної інформації. Виходячи з перелічених чинників обираються відповідні просторово-часові характеристики моделі, визначаються крок розрахунків в часі та схематизація поверхні водозбору.

У цій роботі при розробці просторової моделі застосовувалася методика оптимальної дискретизації полів чинників стоку за окремими частковими площинами, що була запропонована О.Г. Іваненком [6].

В цьому випадку на водозборі будується система еквідистант з відстанню між ними $\Delta x_{сер}$, що відповідає обраному розрахунковому інтервалу часу Δt і забезпечує допустиму помилку деталізації ординат гідрографа стоку. Осереднення основних чинників стоку та виносу забруднювальних речовин виконується за ділянками вздовж виділених еквідистант.

При складанні схеми водозбору площа якого розділена на часткові квадрати відлік довжин еквідистант ведеться від головного русла. Відповідно до цієї схеми організується формування масивів вводу вхідної інформації за водозбором. Центр кожного квадрату має певні координати (x, y) , що фіксують його місцеположення на водозборі. Вхідна інформація подається для кожного квадрату низкою середніх значень показників місцевих характеристик поверхні водозбору.

В основу детермінованих моделей стоку, виносу речовин з водозбору і формування зовнішнього навантаження на

водойму покладені закони збереження маси рідини, що рухається, а також розчинених і завислих домішок, записані у вигляді диференціальних рівнянь. Однією з основних переваг цих моделей є можливість розрахунку характеристик процесів, що вивчаються, в залежності від просторової й часової координат. Тому у відповідності з математичною основою такі моделі є моделями з розподіленими параметрами.

Запропонована модель процесів виносу розчинених хімічних речовин з поверхні водозбору складається з часткових процесів, які описуються рівняннями, представленими нижче.

1. Інтенсивність водоутворення та інфільтрація. Для розрахунку гідрографів водоутворення використовується різницева формула [7]

$$h_t = a_t - k_t, \quad (1)$$

де h_t – інтенсивність водоутворення, мм/хв; a_t – інтенсивність опадів, мм/хв; k_t – інтенсивність інфільтрації, мм/хв.

А.М. Бефані [7] розробив теорію інфільтрації для моделі порового простору, представленого вертикальними макропорами і волосяними капілярами, що відходять від них, яка має такий вигляд

$$k_t = k_0 + \frac{A}{t^n}, \quad (2)$$

де k_0 – стала інтенсивність інфільтрації, мм/хв; A – параметр інфільтрації, пов'язаний зі зволоженням, мм; n – показник редукції, що дорівнює 0,667; t – час, хв.

Усі параметри формули (2) залежать від будови порового простору, тобто від типа ґрунтів.

2. Поверхневий схиловий стік. За відсутності на схилі зон підпору за умови мінімальної дії на процес стікання інерційних сил для описання поверхневого дощового стоку зі схилу одиничної ширини малого ухилу часто використовується одновимірне рівняння кінематичної хвилі, яке у спрощеному вигляді

автором [7] записується таким чином:

$$(n+1)mI_{cx}^u y^n \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = h_t, \quad (3)$$

де n , u – параметри форми поперечних перерізів струмків; m – параметр, що залежить від шорсткості та мікрорельєфу поверхні схилу; y – глибина потоку, мм; I_{cx} – ухил поверхні схилу, ‰; t , x – змінні координати часу й довжини схилу.

3. Підповерхневий схиловий стік. Динаміка суцільного стікання води шаром Z по поверхні відносного водоупору на схилі одиночної ширини описується за моделлю, яка розроблена А.М. Бєфані [7]:

$$\delta \frac{\partial z}{\partial t} + v_0 \sqrt{I_0} \delta_\delta \frac{\partial z}{\partial x} = h_t, \quad (4)$$

де δ – коефіцієнт акумуляції; z – глибина підповерхневого потоку над відносним водоупором, мм; v_0 – параметр, що залежить від діаметру та форми перерізу макропор пухко-уламкового шару; I_0 – ухил поверхні відносного водоупору, ‰; δ_δ – коефіцієнт дренажної водовіддачі.

4. Змив розчинених домішок. Для моделювання виносу розчинених хімічних речовин з поверхневим стоком використовується рівняння нерозривності, що описує транспортування розчинених домішок на схилі одиночної ширини з врахуванням взаємодії з ґрунтовим покривом [1, 6]:

$$\frac{\partial(cy)}{\partial t} + \frac{\partial(cq')}{\partial x} = k_c(c_p - c) \cdot h, \quad (5)$$

де c – концентрація розчиненої хімічної речовини, осереднена за глибиною, мг/дм³; q' – приплив води в одиницю часу на одиницю довжини схилу, м³/м·с; k_c – коефіцієнт сорбції-десорбції; c_p – рівноважна концентрація речовини в ґрунтовій воді, мг/дм³; h – шар ґрунту,

що бере участь у формуванні хімічного стоку, м.

Для чисельного вирішення перелічених вище рівнянь складалися їх кінцево-різницеві аналоги, до яких застосовувалися ітераційні методи.

Малі водозбори ЗВБС за умовами формування стоку та виносу розчинених хімічних речовин є репрезентативними для водозборів території Українських Карпат.

В якості об'єкта дослідження в статті використовувався басейн р. Лопушна із замикальним створом в с. Лопушне (площа водозбору 13,2 км²), розташований на території ЗВБС.

Середній ухил річки становить 60,5‰. Річкова мережа добре розвинена; густина її сягає 1,26 км/км². Русло слабкозвивисте, нерозгалужене, шириною від 0,6 до 12 м, переважно 4-5 м. Глибина річки 0,2-0,3 м, найбільша – 0,5 м. Швидкість течії змінюється від 0,3 до 1,5 м/с.

Дно басейну річки є нерівним, кам'янистим, на окремих ділянках галечниково-кам'янистим. Береги круті, заввишки 0,5-1,5 м, в деяких місцях зливаються зі схилами долини. Більшою частиною вони відкриті, задерновані, місцями порослі чагарником і деревами, складені суглинковими і кам'янистими ґрунтами.

Завдяки орографічним і кліматичним особливостям водний режим цієї річки досить складний – відбуваються часті паводки, які характеризуються великою висотою й інтенсивністю. У літній період паводки викликаються дощами, а в зимово-весняний – дощами і снігами.

На досліджуваному об'єкті виконуються регулярні вимірювання ходу опадів за допомогою пловіографів, фактичного ходу витрат води, концентрацій хімічних речовин у річковому стоці.

Результати дослідження та їх аналіз. Процес формування гідрографа виносу хімічних речовин з річкового водозбору, як вже відзначалося вище, можна описати рівняннями (1)-(5) та у загальному випадку представити таким, що складається з таких етапів:

- водоутворення;
- стік води з поверхні схилів;
- винесення забруднювальних речовин зі схиловим стоком.

Рівняння для опису трансформації русловою системою припливу схилових вод та забруднювальних речовин не включені до цієї статті, оскільки є іншою самостійною темою дослідження.

Реалізація описуваної просторової моделі у показана на прикладі дощового паводка, що розпочався 3 серпня 2002 р. о 16 год 04 хв, а закінчився 4 серпня о 18 год 20 хв на водозборі р. Лопушна – с. Лопушне. Протягом цього дощу випало 18,1 мм опадів, що сформувало шар стоку у 8,45 мм.

При складанні схеми водозбору було побудовано 8 еквідистант з кроком у 2 км, часовий інтервал квантування гідрографів становив 30 хв. Змінними за територією водозбору вважалися середні довжини та ухили схилів, які вводилися у модель за допомогою схеми оптималь-

ної дискретизації, описаної вище.

Необхідно ще раз відзначити, що основною перевагою моделей з розподіленими параметрами є можливість встановлення окремих розрахункових характеристик не лише у замикальному створі басейну, а й за його територією на кожний розрахунковий інтервал часу.

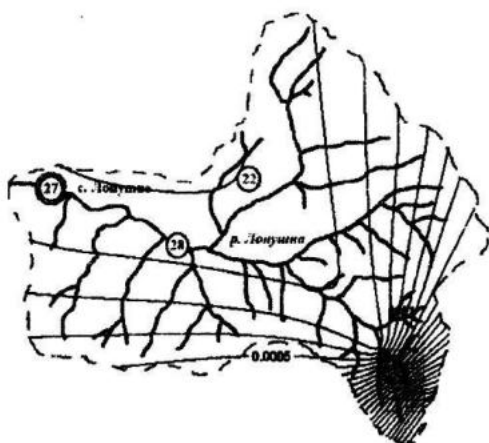
Використовуючи діалоговий метод оптимізації [6], було встановлено оптимальні параметри моделі, представлені у табл. 1, обчислено поля інфільтрації дощових опадів, водоутворення, інтенсивності схилового стоку води, інтенсивності виносу розчинених хімічних речовин зі схиловим стоком та гідрографи стоку води і забруднювальних речовин в замикальному створі р. Лопушна.

Т а б л и ц я 1

Оптимальні параметри моделі

k_0 , мм/хв	A , мм	k_n , мм/хв	$A_{нідр}$, мм	m , м/с	v_0 , м/хв	d	δ	δ_δ	a_p	c_i	k_c	h , м
0,0055	0,10	0,0024	0,10	0,032	0,69	0,18	0,20	0,60	0,52	6200	1,28	0,43

В якості прикладу на рис. 1 представлено розраховане за описуваною моделлю поле інтенсивності схилового припливу води станом на 17 год 04 хв, а на рис. 2 – ізолінії інтенсивності припливу нітратів станом на 23 год 04 хв.



Р и с. 1. Поле середніх інтенсивностей схилового припливу води по еквідистантах станом на 3 серпня 2002 р. 17 год 04 хв

Загальний вигляд побудованих через

кожні 30 хв полів середніх інтенсивностей схилового припливу, свідчить про єдині закономірності їх зміни. Так, максимальні значення середніх інтенсивностей схилового припливу притаманні верхів'ям р. Лопушна, оскільки ізолінії тут мають найбільшу густину.

За весь період проходження паводку їхній максимум спостерігався 3 серпня 2002 р. о 18 год 04 хв та становив 0,00260 мм/хв. Найменші значення властиві нижній частині водозбору, тут ізолінії мають більш розряджену структуру, а значення інтенсивностей схилового стоку зменшуються до нульових значень вже починаючи з 10 год 04 хв 4 серпня 2002 р., коли відбувається відповідне зменшення інтенсивності дощу.

Описуючи поля інтенсивностей схилового припливу нітратів, слід відзначити, що вони характеризуються більш різноманітною структурою ізоліній. Однак і тут спостерігається загальна закономірність зменшення величин поверхневого виносу нітратів від витoku, де вони досягають величини майже 340 мг/с до зами-

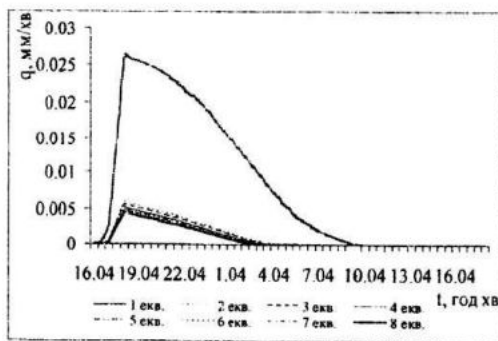
кального створу, де спостерігається зниження їх величин до 240 мг/с і нижче.



Р и с. 2. Поле середніх інтенсивностей скилового припливу нітратів по еквідистантах станом на 3 серпня 2002 р. о 23 год 04 хв

Описувані закономірності зміни розрахункових величин за площею водозбору добре узгоджуються з їхньою мінливістю в часі, оскільки запропонована модель надає можливість й такого представлення обчислених результатів.

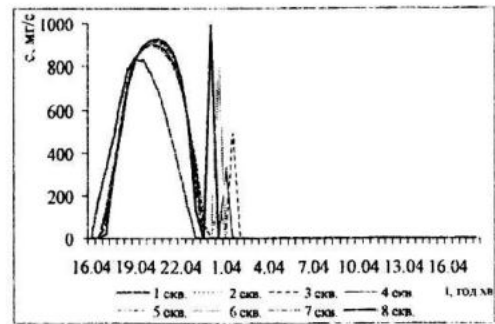
Так, на рис. 3 показано гідрограф скилового стоку води, а на рис. 4 гідрограф скилового стоку нітратів за весь розрахунковий період, що складає більше 2 діб та його трансформацію по еквідистантах впродовж цього періоду.



Р и с. 3. Гідрограф інтенсивності скилового припливу води

Останнім етапом розрахунків в запропонованій моделі є трансформація русловою системою обчислених величин скилового водного та хімічного стоку для останньої еквідистанти, яка є замикальним створом водозбору, представлення одержаних результатів у вигляді гідрографів руслового стоку та порів-

няння їх з фактичними даними спостережень за показниками якості.



Р и с. 4. Гідрограф інтенсивності скилового припливу нітратів

Задовільна відповідність обчислених та фактичних гідрографів забезпечується такими показниками якості, як:

- відношення обчисленого і виміряного шарів паводку – $y_o / y_\phi = 0,76$;
- зсув за часом обчисленого максимуму від фактичного – $\Delta T = 0$;
- величина критерію якості, що показує ступінь відповідності обчисленого і спостереженого гідрографів, та дорівнює

$$K = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{\phi_i} - Q_{o_i})^2}{N \cdot \bar{Q}_\phi}} = 0,56,$$

де Q_{ϕ_i} – фактична витрата паводку на i -й інтервал часу, m^3/c ; Q_{o_i} – обчислена витрата паводку на i -й інтервал часу, m^3/c ; \bar{Q}_ϕ – середнє значення фактичної витрати паводку, m^3/c ; N – число ординат гідрографа паводку;

- відхилення обчисленої максимальної витрати від фактичної витрати, що відповідно дорівнює

$$\Delta Q = \frac{Q_{\max_o} - Q_{\max_\phi}}{Q_{\max_\phi}} \cdot 100 = -0,71\%,$$

де Q_{\max_o} – обчислена максимальна витрата, m^3/c ; Q_{\max_ϕ} – фактична макси-

мальна витрата, м³/с.

Іншим показником правильності вибору параметрів моделі є критерій якості методики, що встановлюється за відношенням \bar{S}/σ :

$$\bar{S} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{\phi_i} - Q_{o_i})^2}{N}}, \quad (6)$$

де \bar{S} – середня квадратична похибка перевірочних розрахунків;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{\phi_i} - \bar{Q}_{\phi})^2}{N}}, \quad (7)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення виміряних витрат паводку від середнього.

Розрахований за описуваними залежностями (6)–(7) критерій якості методики \bar{S}/σ дорівнює 0,59, тобто розрахунок гідрографів паводкового стоку води та виносу нітратів за допомогою запропонованої моделі з використанням обраних оптимальних параметрів, можна кваліфікувати як задовільний.

Висновки. В результаті виконаних розрахунків одержана задовільна відповідність обчислених та виміряних витрат води й концентрацій нітратів у замикальному створі басейну р. Лопушна. Оптимальні значення параметрів, одержані в результаті параметризації моделі за даними вимірів у замикальному створі, є інтегральними характеристиками всього водозбору.

Однак, хоча результати розрахунків підтвердили адекватність запропонованої моделі описуваним процесам формування стоку та виносу нітратів на досліджуваному експериментальному водозборі, в подальшому необхідне удосконалення математичної структури моделі, пов'язане з більш детальним описом процесів переносу нітратів в ґрунтовому профілі та виносу зі стоком.

Важливою областю практичного застосування запропонованої просторової моделі є можливість встановлення оптимального розрахункового гідрографу паводкового стоку для проектування акумуляційних або регулюючих водосховищ та інших споруд, а також обчислення надходжень у водні об'єкти різних домішок і розчинених речовин з поверхневим схиловим стоком при відомій концентрації цих речовин у ґрунтах для оптимізації водоохоронних заходів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кондратьев С.А. Формирование внешней загрузки на водоемы: проблемы моделирования. – СПб: Наука, 2007. – 253 с.
2. Виноградов Ю.Б. Математическая модель «Сток – эрозия – загрязнение» // Метеорология и гидрология, 1998. – №5. – С. 87-96.
3. Назаров Н.А. Оценки эрозионного смыва почв и выноса биогенных веществ с поверхностным стоком талых и дождевых вод в речном бассейне // Водные ресурсы, 1996. – т.32, № 6. – С. 645-652.
4. Singh V.P., Woolhiser D.A. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology // Journal of Hydrology Engineering, 2002. – Vol.7, №4. – P. 270-292.
5. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. – М.: Наука, 1993. – 104 с.
6. Иваненко А.Г. Описание смыва загрязняющих веществ с малых водосборов // Метеорология, климатология та гідрологія. – 2001. – вип.42. – С. 168-178.
7. Бєфани А.Н. Основные положения теории речного стока // Труды ОГМИ. – 1958. – Вып. XII. – С. 99-176.