

УДК 556.555.8: (556.51+556.535.6)

О.Г. Іваненко, д.г.н, **М.В. Захарова**, інж.
Одеський державний екологічний університет

ПРОСТОРОВА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ГІДРОГРАФІВ СТОКУ РОЗЧИНЕНИХ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН І ЗВАЖЕНИХ НАНОСІВ

У статті наводиться короткий опис структури просторової моделі паводкового стоку і її використання для розрахунків гідрографів стоку розчинених хімічних речовин і зважених наносів з поверхні річкових водозборів на прикладі даних Закарпатської воднобалансової і Карпатської селестокової станції.

Ключові слова: просторова модель, паводковий стік, гідрограф, розчинені хімічні речовини, зважені наноси.

Вступ. Значне забруднення навколишнього середовища, яке пов'язане з розвитком господарської діяльності людини, стимулює розробку математичних моделей, придатних для проектування водоохоронних заходів на річках і водоймищах. Особливо важливе це для невеликих річок, які мають низьку самоочисну здатність і тому дуже чутливі до антропогенного впливу. Однак можливості подібних моделей поки ще дуже обмежені через складність цих процесів, а також недоліки і низьку якість вихідної інформації. Тому при вирішенні конкретних гідроекологічних задач доводиться орієнтуватися на розробку моделей, які враховують головні фактори виносу забруднюючих речовин зі схилів басейну, а саме: дощові опади, зволоження ґрунтів, ухил, шорсткість, мікрорельєф схилів, вміст хімічних речовин на схилах та ін., які характеризуються своєю значною неоднорідністю по території.

До числа найбільш відомих моделей поверхневого винесення забруднюючих речовин можна віднести наступні: 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 [1,2]; WEPP (The Water Erosion Prediction Project), що базується на кінематико-хвильовому моделюванні схилового стоку і змиву [3,4]. Відомі також моделі: EUROSEM, AGNPS, KINEROS, ANSWERS, GLEAMS та ін. [9,10 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 забруднюючих речовин з водозборів річок [5]. На базі Інституту проблем математичних систем і машин НАН України та за участю Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова була розроблена модель RUNTOX, яка представляє собою двовимірну модель перерозподілу радіонуклідів в межах схилу чи невеликої річки у розчиненому або адсорбованому вигляді на наносах [6].

Матеріали і методи дослідження. Проблема врахування просторової нерівномірності основних факторів стоку води, змиву хімічних речовин та наносів у моделі було вирішено шляхом застосування методики оптимальної дискретизації полів факторів стоку за окремими частковими площинами. Це необхідно для вивчення переносу поверхневими водами забруднюючих речовин, оскільки протягом цього процесу речовини піддаються якісній і кількісній змінам.

Послідовність підсумовування стоку води з часткових площадок і формування загальної витрати виносу речовин паводком через замикальний створ описується рівнянням типу кінематичної хвилі для руслового стоку [7]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{B_x}{2 \cdot L_{\bar{n}\delta}} \cdot q'_{x,t}, \quad (1)$$

де Q – витрата води паводку в час t і в створі x на 1 м ширини русла, $м^3/с$;

$q'_{x,t}$ – модуль схилового припливу на 1 м ширини русла, $м^3/с$;

ω – площа живого перерізу, $м^2$;

B_x – ширина басейну по еквідистантах руслового добігання, $м$;

$L_{\bar{n}\delta}$ – середня довжина схилу, $м$.

Швидкість добігання води по руслу визначається залежно від поточних значень витрат води паводків і ухилу русел [8], тобто

$$v = a_p \cdot \left(\frac{1+L}{1+l_i} \right)^{0.25} \cdot I_{\delta}^a \cdot Q^b, \quad (2)$$

де a_{δ} – русловий параметр, який залежить від шорсткості й форми русла;

L – повна довжина русла, $м$;

l_i – відстань від початку річки до i -го створу, $м$;

I_{δ} – ухил русла, $\%$;

a і b – параметри формули.

Для чисельного вирішення системи рівнянь (1) та (2) застосовувалася чотирьохточкова неявна схема Прейсмана. Вирішувалася вона ітераційним методом за узагальненою формулою Ньютона.

Динаміка схилового стоку у моделі описується за допомогою відомого рівняння кінематичної хвилі [7].

Модель процесу змиву та переносу водним потоком наносів описується за допомогою наступного рівняння [5,8]:

$$\frac{\partial(Sy)}{\partial t} + \frac{\partial(Sq')}{\partial x} = E_r + E_q, \quad (3)$$

де S – мутність води схилового стоку, $кг/м^3$;

y – глибина схилового потоку, $м$;

q' – витрата води з метрової смуги схилу, $м^3/с$;

E_r, E_q – функції, які описують інтенсивність надходження в потік наносів за рахунок впливу на поверхню ґрунту ударів дощових крапель і розмивання ґрунту водним потоком, $кг/м^2 \cdot с$.

Ударний вплив крапель на ґрунт і турбулізація потоку невеликої глибини сприяє його насиченню зваженими наносами, що враховується параметром E_r . Обчислюється E_r за емпіричною залежністю [5,8]:

$$E_r = k_r r^{km}, \quad (4)$$

де r – інтенсивність дощу, м/с;
 k_r, k_m – емпіричні коефіцієнти.

Перенос наносів поверхневим стоком відбувається в умовах, коли відрив частинок ґрунту потоком і їхнє переміщення можливе при наявності в потоці достатньої кількості енергії, в іншому випадку відбудеться осадження частинок.

Обчислення функції E_q , яка враховує вплив стікаючої води на змив наносів, виконується за наступною залежністю:

$$E_q = k_q (T_s - S)q', \quad (5)$$

де k_q – емпіричний коефіцієнт;
 T_s – транспортуюча здатність потоку, кг/м³.

Розрахунок транспортуючої здатності схилового стоку ведеться за формулою:

$$T_s = k_n I_{\text{н}}^{5/3} q'^{5/3}, \quad (6)$$

де k_n – емпіричний коефіцієнт.

На підставі наведених вище залежностей обчислюється надходження твердих частинок у потік, причому за рівнянням (3) обчислюється мутність і витрата твердого стоку для всіх ординат графіку розрахункового дощу.

Форма запису моделі кінематичної хвилі для виносу хімічних речовин схиловим потоком води у русло річок відповідає рівнянню (3), тільки замість мутності потоку S приймається концентрація заданої хімічної речовини C , а у правій частині рівняння враховуються функції джерел-стоків для заданої хімічної речовини [5,8]:

$$\frac{\partial(C_i y)}{\partial t} + \frac{\partial(C_i q')}{\partial x} = F_i + N_i, \quad (7)$$

де C_i – концентрація хімічної речовини у стоці, мг/дм³;

F_i – функція, яка враховує надходження речовини у водний потік;

У зв'язку зі швидкоплинністю схилового стоку функція N_i не враховується.

Для розрахунку функції F_i можна використовувати наступну формулу [5,8]:

$$F_i = k_i (C_{pi} - C_i) \cdot h \cdot q', \quad (8)$$

де h – глибина діючого шару, м;

k_i – коефіцієнт сорбції-десорбції i -ї речовини;

C_{pi} – рівноважна концентрація, мг/дм³.

Рівноважна концентрація обчислюється за наступною формулою [8]:

$$C_{pi} = C_{vi} / (p_i (d_i - C_{vi})), \quad (9)$$

де p_i та d_i – чисельні значення коефіцієнтів;

C_{vi} – початкова концентрація хімічної речовини у ґрунті, $мг/кг$.

Чисельне вирішення усіх наведених рівнянь проводилося за ітераційною схемою.

Для реалізації моделі використовувалися матеріали спостережень за ходом стоку, опадів, наносів і хімічним складом на водозборах Закарпатської воднобалансової і Карпатської селестокової станцій: р. Студений – с. Нижній Студений ($F=25.4 км^2$), р. Пилипець – с. Пилипець ($F=44.2 км^2$), р. Репінка – с. Репінка ($F=203 км^2$), р. Ріка – м. Міжгір'я ($F=550 км^2$), р. Буярський – с. Буярський ($F=10.0 км^2$), р. Каменка – с. Дора ($F=18.1 км^2$), р. Женка – м. Яремча ($F=29.0 км^2$), р. Прут – м. Яремча ($F=597 км^2$).

Однак застосування подібної моделі для практичних розрахунків має низку утруднень, одним з яких є процес оптимізації її параметрів, оскільки усі параметри між собою знаходяться в певній залежності. Ось чому одним з найголовніших завдань, яке стоїть при розрахунках є необхідність попереднього встановлення оптимальних значень параметрів моделі. У роботі застосовувався метод оптимізації, який ґрунтується на діалоговій системі пошуку початкової точки оптимізації, яка відповідає реальним умовам стоку на водозборі, і базовій програмі оптимізації, ефективність якої перевірена на вирішенні задач оптимізації моделей багатofакторних явищ [8].

Результати дослідження та їх аналіз. Оптимізація параметрів рівнянь (3-9) виконувалася згідно з рекомендаціями [5,8]. Результати оптимізації для окремих паводків і декількох водозборів наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати оптимізації параметрів рівнянь (3-9)

(при $k_m=1.00$, $k_q=1.00$, $h=0.01 м$)

№ п/п	Річка – пост	Дата	Параметри складової твердого стоку		Параметри складової хімічного стоку
			k_n	k_r	$C_{vi}, мг/100г$
1	р. Пилипець с. Пилипець	26.05.72	$3.00 \cdot 10^3$	25.0	2.15
		31.08.72	$3.00 \cdot 10^3$	75.0	1.00
		23.07.73	$3.00 \cdot 10^3$	5.00	3.30
2	р. Репінка с. Репіне	11.06.67	$11.0 \cdot 10^8$	97.0	6.00
		18.05.68	$4.50 \cdot 10^8$	97.0	2.20
		03.08.72	$7.50 \cdot 10^7$	97.0	3.50
		31.08.72	$4.50 \cdot 10^8$	97.0	3.50
3	р. Каменка с. Дора	03.07.68	$37.0 \cdot 10^8$	97.0	20.0
		08.06.69	$17.0 \cdot 10^8$	97.0	4.50
		10.05.73	$18.0 \cdot 10^8$	97.0	1.50
4	р. Прут м. Яремча	16.07.66	$3.25 \cdot 10^8$	97.0	9.00
		03.07.68	$17.0 \cdot 10^8$	97.0	7.50
		08.05.69	$1.60 \cdot 10^8$	97.0	0.90

Подальші розрахунки гідрографів виконані на підставі отриманих оптимальних параметрів. На рис. 1 та 2 наведені суміщені графіки опадів, фактичного стоку води, фактичні значення витрат зважених наносів і розчину іонів нітриту та обчислені ординати витрат зважених наносів і іонів нітриту.

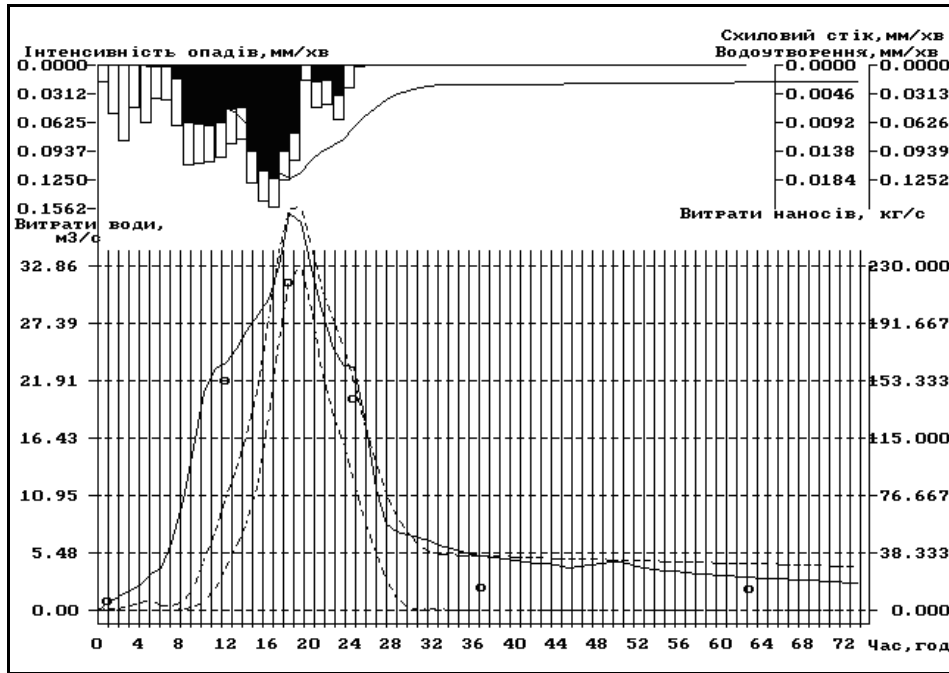


Рис. 1 – Комплексний графік стоку води та зважених наносів в/п р. Каменка – с. Дора (08.06.69):

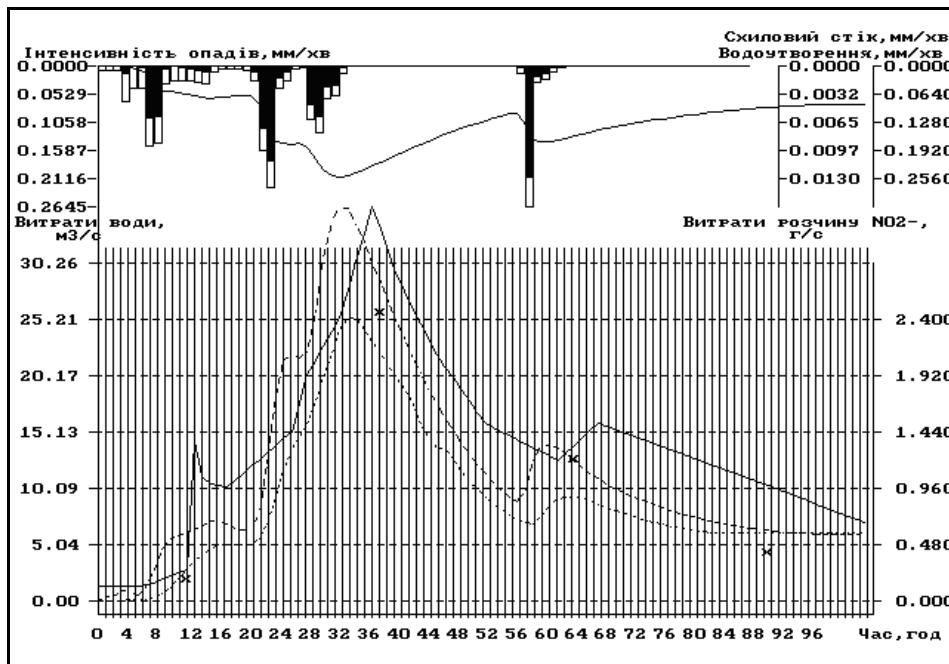


Рис. 2 – Комплексний графік стоку води та розчину іонів нітриту в/п р. Репінка – с. Репіне (03.08.72):

- фактичний стік води;
- розрахований стік води;
- розрахований стік зважених наносів та розчину іонів нітриту NO_2^- ;
- фОтичні значення витрат зважених наносів;
- × фактичні значення витрат розчину іонів нітриту NO_2^- .

Таблиця 2 – Результати розрахунків кількості винесених за паводок іонів нітриту і зважених наносів

№ п/п	Річка – пост	Дата	Тривалість паводку, год	Об'єм стоку·10 ³ , м ³	Кількість винесених за паводок	
					зважених наносів, т	іонів нітриту, кг
1	р. Студений с. Нижній Студений	11.06.65	105	2440	–	8.55
		11.06.67	95	479	783.9	15.8
		13.05.70	76	1403	1906.5	56.3
		31.08.72	70	825	2660.2	–
2	р. Пилипець с. Пилипець	04.07.65	46	1445	351.4	–
		26.05.72	99	1097	211.1	329.6
		31.08.72	70	1981	240.3	172.2
		23.07.73	45	558	24.2	11.3
3	р. Репінка с. Репінка	11.06.67	87	3676	4181.1	311.2
		18.05.68	95	2539	1067.3	1174.1
		13.05.70	126	13537	–	1988.9
		18.08.70	51	2620	–	213.0
		03.08.72	95	4060	2614.4	334.9
		04.08.72	97	2610	–	207.7
		31.08.72	70	5397	7270.7	279.2
4	р. Ріка м. Міжгір'я	11.06.67	60	9915	–	92.6
		18.05.68	79	4941	204.7	–
		17.08.70	92	12057	2264.2	–
		31.08.72	86	17246	19680.5	–
		18.07.74	90	9635	–	11.2
		02.08.74	91	4482	885.6	16.2
5	р. Буярьський с. Буярьський	03.07.68	41	106	46.1	–
		12.07.69	44	285	163.4	–
6	р. Каменка с. Дора	03.07.68	52	1038	5692.7	324.9
		08.06.69	71	2216	6507.9	104.1
		10.05.73	59	787	587.4	12.3
7	р. Женка м. Яремча	04.07.76	102	2027	1075.2	–
		05.06.80	59	1134	36.7	–
8	р. Прут м. Яремча	29.05.66	102	6737	1245.1	–
		16.07.66	141	2269	1824.0	231.7
		22.05.67	91	10600	2172.4	–
		03.07.68	47	15323	53308.1	2215.4
		08.05.69	143	25159	1665.9	385.9
		10.05.73	143	35499	31130.6	–

Аналіз табл. 2 показує, що паводок, який спостерігався на р. Прут – м. Яремча 3 липня 1968 р. і тривав біля двох діб, виніс найбільшу кількість зважених наносів – 53308.1 т й іонів нітриту NO_2^- – 2215.4 кг. Найменша кількість зважених наносів – 24.2 т спостерігалася за паводок, що відбувся на р. Пилипець – с. Пилипець 23 липня 1973 р. і тривав біля двох діб, а найменша кількість іонів нітриту NO_2^- – 8.55 кг спостерігалася за паводок, який відбувся на р. Студений – с. Нижній Студений 11 червня 1965 р. і тривав більше чотирьох діб.

Висновки. Результати зіставлення отриманих гідрографів стоку і фактичних даних показують можливість застосування запропонованої просторової моделі розрахунку стоку розчинених речовин і зважених наносів з поверхні річкових водозборів Закарпаття. Отримані в результаті оптимізації нові значення меж змін параметрів рівнянь надалі можна використовувати для розрахунку стоку розчинених хімічних речовин і зважених наносів з поверхні мало вивчених річкових водозборів даного регіону або водозборів не забезпечених необхідними для розрахунків вхідними даними.

Список літератури

1. *Виноградов Ю.Б.* Математическая модель «Сток – эрозия – загрязнение» // Метеорология и гидрология, 1998. - №5. – С.87-96.
2. *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.
3. *Неаринг М.А., Булыгин С.Ю., Котова М.М.* Первичная верификация и адаптация модели WEPP для условий Украины: проблемы, пути решения, перспективы // Почвоведение, 1998. - №1. – С.96-99.
4. *Лэйн Л.Д., Ренард К.Г., Фостер Г.Р., Лафлен Д.М.* Разработка и применение современных методов прогноза эрозии – опыт Министерства сельского хозяйства США // Почвоведение, 1997. - №5. – С.606-615.
5. *Кондратьев С.А.* Математическое моделирование стока, водной эрозии и выноса химических веществ с малых водосборов // Доклады секции русловых процессов и секции водных ресурсов и водного баланса Научного Совета по проблеме «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» ГКНТ. Современное состояние малых рек СССР и пути их использования, сохранения и восстановления. – вып. 2. – Л.: Гидрометеиздат. – 1991. – С.61-68.
6. *Светличный А.А., Чёрный С.Г., Швёбс Г.И.* Эрозиоведение. Теоретические и прикладные аспекты. – Сумы: Университетская книга, 2004. – 410 с.
7. *Бэфани А.Н.* Основы теории ливневого стока // Труды ОГМИ, 1949. – Ч. 1. – С. 39-175.
8. *Иваненко А.Г.* Описание смыва загрязняющих веществ с малых водосборов // Метеорология, кліматологія та гідрологія. – 2001. – вип.42. – С.168-178.
9. *Lane L.J., Nichols M.H., Paige G.B.* Modeling erosion on hillslopes: concepts, theory and date // Proceedings of the International Congress on Modeling and Simulation (MODSIM'95). – Newcastle, New South Wales. – 1995. – P.1-7.
10. *Singh V.P., Woolhiser D.A.* Mathematical Modeling of Watershed Hydrology // Journal of Hydrology Engineering, 2002. – Vol.7, №4. – P.270-292.

Пространственная модель для расчетов гидрографов стока растворенных химических веществ и взвешенных наносов. Иваненко А.Г., Захарова М.В.

В статье приводится краткое описание структуры пространственной модели паводкового стока и ее использование для расчетов гидрографов стока растворенных химических веществ и взвешенных наносов с поверхности речных водосборов на примере данных Закарпатской воднобалансовой и Карпатской селестоковой станций.

Ключевые слова: *пространственная модель, паводочный сток, гидрограф, растворенные химические вещества, взвешенные наносы.*

Spatial model for the calculation of hydrographs of runoff of dissolved chemical matters and self-weighted sediments. Ivanenko O.G., Zakharova M.V.

The brief description of structure of spatial model flood's runoff and its use for calculations of hydrographs of runoff of dissolved chemical matters and self-weighted sediments from a surface of rivers catchments on the basis of Zakarpathian and Carpathian water-balance stations databases is given in the article.

Key words: *spatial model, flood runoff of water, hydrograph, dissolved chemical matters, self-weighted sediments.*