

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-36-02>

УДК (UDC): 556.16

В. А. ОВЧАРУК¹, д-р географ. наук, доц.,
директор науково-навчального гідрометеорологічного інституту
e-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5654-3731>

М. О. МАРТИНЮК¹
аспірант кафедри гідрології суші
e-mail: martyniuk0904@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1332-4907>

¹Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ОПЕРАТОРНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНИХ МОДУЛІВ СТОКУ ВЕСНЯНИХ ВОДОПІЛЬ І ДОЩОВИХ ПАВОДКІВ РІЧОК БАСЕЙНУ ВІСЛИ В МЕЖАХ УКРАЇНИ

Мета. Обґрунтування розрахункових характеристик схилового припливу та руслового стоку, а також створення сучасної методичної бази для нормування характеристик максимального стоку весняних водопіль та дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України.

Методи. При розрахунках максимального стоку весняних водопіль та дощових паводків виконувалась статистична обробка рядів даних за методами моментів та найбільшої правдоподібності. Три-параметричний гамма-розподіл використаний для розрахунку шарів стоку та витрат води рідкісної імовірності перевищення. Для визначення характеристик максимального стоку річок прийнята, в якості розрахункової, операторна модель, розроблена Гопченко Є. Д. (2001) та удосконалена Овчарук В.А. (2017). Для розрахунку тривалості схилового припливу використаний комплексний метод з використанням програмного комплексу «Сагуар», розробленого на кафедрі гідрології суші ОДЕКУ.

Результати. Визначені стандартні статистичні характеристики часових рядів максимального стоку весняних водопіль та дощових паводків, які використані в подальших розрахунках максимальних витрат води та шарів стоку рідкісної імовірності перевищення. Обґрунтовані та узагальнені за територією усі параметри базової операторної моделі формування максимального стоку: визначені коефіцієнти часової нерівномірності схилового припливу та тривалість схилового припливу, розрахована трансформаційна функція і визначені максимальні модулі схилового припливу для дощових паводків і весняних водопіль на річках басейну р. Вісла. Більшість розрахункових параметрів узагальнені за територією з використанням ГІС-технологій або розрахункових рівнянь з мінімальною кількістю необхідних вхідних даних.

Висновки. Розроблена регіональна методика для визначення максимального стоку весняних водопіль і дощових паводків на річках басейну р. Вісли. На відміну від попередніх розробок вітчизняних авторів, перевагою є те, що використання операторної моделі дозволяє застосовувати єдину формулу, незалежно від генезису максимального стоку та площі водозборів. Отримані результати дослідження можуть бути використані при плануванні гідротехнічного будівництва та протипаводкових заходів в басейні р. Вісла в межах України з метою мінімізації збитків та захисту населення від небезпечної дії вод. Запропонована модель може бути використана і для інших територій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: максимальний стік, схиловий приплив, весняне водопілля, дощові паводки

Як цитувати: Овчарук В. А., Мартинюк М. О. Застосування операторної моделі для визначення максимальних модулів стоку весняних водопіль і дощових паводків річок басейну Вісли в межах України. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2021. Вип. 36. С.22-33. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-36-02>

In cites: Ovcharuk, V. A. & Martyniuk, M. O. (2021). Application of the operator model for determination of maximum modulus of spring and rain floods at the rivers of Vistula basin within Ukraine. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (36), 22-33. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2021-36-02>

© Овчарук В. А., Мартинюк М. О., 2021



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Вступ

Протягом 1998 та 2017 років повені в усьому світі спричинили економічний збиток понад 650 мільярдів доларів США та призвели до близько 1 420 000 жертв [1]. За період 2009-2018 рр. кількість катастрофічних природних явищ склала 343, а за один 2019 рік – 396 [2]. Серед цих небезпечних природних явищ екстремальні паводки становлять значну загрозу для людського суспільства, економіки та навколишнього середовища, спричиняючи людські втрати [3-6]. Басейн річки Вісли є транскордонним і розташований на території Польщі, України, Білорусі та Словаччини, й отже тут можуть проявлятися як наслідки повеней в Європі, так і в Україні. На території України басейн річки Вісла представлений двома суббасейнами – р. Сян та р. Західний Буг [7]. Досліджуваний басейн розташований на північному заході Волино-Подільської височини; вододіли проходять по грядам і пагорбам, тому чітко виражені. Середня висота водозборів 250 – 300 м.

Формування максимальних витрат води річок досліджуваного басейну залежить від сніготанення та випадіння дощів в зимово-весняний період та від випадіння зливових опадів в літньо-осінній період. Захід України, де і розташований басейн р. Вісла, чи не щороку потерпає від повеней, що призводять до підтоплення населених пунктів, сільськогосподарських угідь, доріг. Отже, розрахунки максимального стоку дощових паводків та весняних водопіль має надзвичайно важливе практичне значення.

Однією з головних проблем при дослідженні максимального стоку річок України, а також саме річок досліджуваного басейну є їх недостатня гідрологічна вивченість. В басейні р. Вісла це пов'язано з недостатньою кількістю гідрологічних постів та їх нерівномірним розподілом. Так, більшість постів розташована в південній частині басейну, а решта практично не охоплена спостереженнями.

Методика дослідження

Для розрахунків максимального стоку дощових паводків та весняних водопіль на території басейну р. Вісла обрано дані багаторічних спостережень для 18 гідрологічних постів за період від початку спостережень до 2015 р. Як було зазначено, кількість гідрологічних постів на досліджуваній території досить обмежена і пости розподілені нерівномірно. Щоб уникнути проблем, пов'язаних з

дослідженню максимального стоку річок України, через його надзвичайно важливе значення, присвячено багато наукових робіт, зокрема представниками одеської гідрологічної школи такими вченими як А. М. Бефані, Н. Ф. Бефані, Є. Д. Гопченко, Ж.Р. Шакірзанова, В.А. Овчарук [8-11] та ін., та представниками київської гідрологічної школи (А. В. Огієвський, Й. А. Железняк, В.В.Гребінь, В.І. Вішневський, Горбачова Л.О. [12-17]). З іншого боку, на теперішній час для визначення розрахункових характеристик максимального стоку річок України досі залишається діючим нормативний документ СНіП 2.01.14-83, який вже давно скасований або оновлений у більшості країн колишнього СРСР. Стосовно розглядуваного басейну Вісли в межах України, також існують регіональні розробки, представлені у довіднику «Ресурси поверхневих вод ССРСР», але там використанні дані з періодом спостережень до 1970-1980 років, які на даний час не є актуальними. Серед регіональних розробок останніх років слід відмітити роботу Розлач В.О. [18], яка присвячена розробці методики короткострокового прогнозування дощового стоку в басейні р.Вісли

Аналіз сучасних методів розрахунку максимального стоку показує, що актуальною залишається запропонована Є.Д. Гопченко та в подальшому удосконалена операторна модель [19,20]. Перевага операторної моделі полягає у можливості врахування всіх факторів формування стоку завдяки чому вона може бути застосована і для весняного водопілля, і для дощових паводків, в той час як відповідно до СНіП 2.01.14-83, розрахунки максимальних витрат води виконуються в залежності від площі водозборів та окремо для паводків і водопіль.

нерівномірністю розподілу гідрологічних постів в досліджуваному басейні, додатково обрано дані по 5 гідрологічних постах в басейні р. Прип'ять, що межує з басейном р. Вісли (рис.1).

Для розрахунків максимального стоку річок басейну р. Вісла в межах України пропонується операторна розрахункова структура максимального стоку, яка має вигляд:

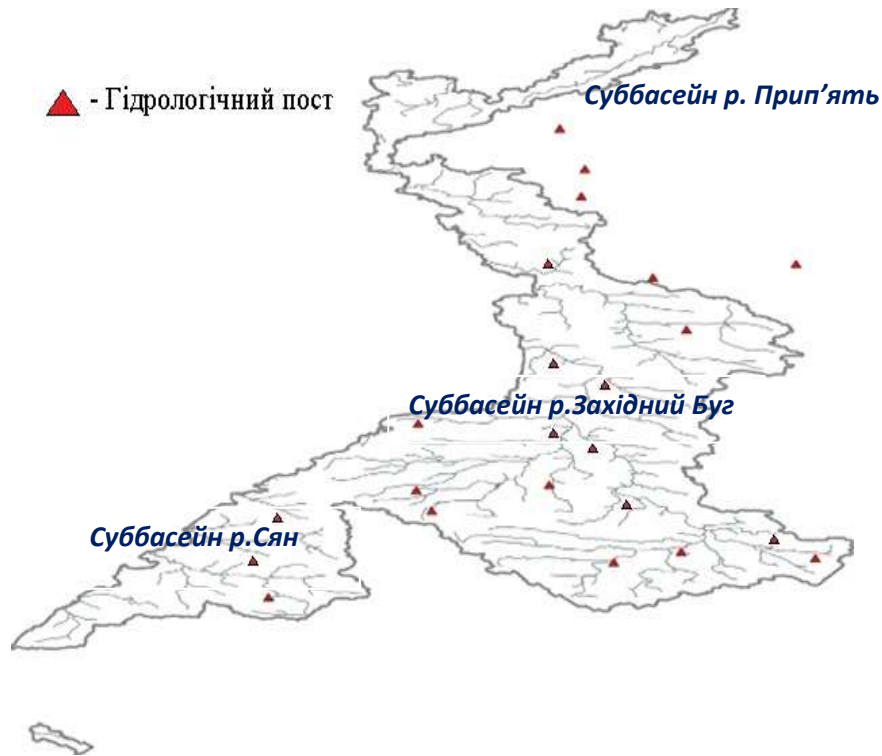


Рис. 1 – Карта-схема розташування гідрологічних постів в басейні р.Вісла в межах України

Fig. 1 – The schematic map of hydrological stations on the Vistula river basin within Ukraine

$$q_m = q'_{1\%} \Psi(t_p/T_0) \varepsilon_F r \lambda_p; \quad (1)$$

де q_m – максимальний модуль руслового стоку забезпеченістю $P\%$, $\text{м}^3/\text{с км}^2$;
 $\Psi(t_p/T_0)$ – трансформаційна функція, яка обумовлена часом руслового добігання t_p ;
 ε_F – коефіцієнт русло-заплавного регулювання;
 r – коефіцієнт зарегулювання максимального стоку озерами і водосховищами проточного типу;
 λ_p – коефіцієнт забезпеченості.

Відповідно, розрахункова формула для визначення модуля схилового припливу має вигляд:

$$q'_{1\%} = 0,28 \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_{1\%}; \quad (2)$$

де $q'_{1\%}$ – максимальний модуль схилового припливу забезпеченістю $P=1\%$, $\text{м}^3/\text{с км}^2$.

$\frac{n+1}{n}$ – коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу;

T_0 – тривалість схилового припливу, год;

$Y_{1\%}$ – шар стоку дощових паводків і весняних водопіль забезпеченістю $P=1\%$, мм.

Шари стоку заданої ймовірності перевищення визначають за результатами стандартної статистичної обробки.

Через відсутність достатньої мережі воднобалансових станцій коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу неможливо безпосередньо виміряти, тому пропонується визначити цей параметр через коефіцієнти часової нерівномірності руслового стоку $(\frac{m+1}{m})$ [21]:

$$\frac{m+1}{m} = \frac{\overline{T_n Q_m}}{\overline{Y_m F}} 86,4; \quad (3)$$

де $\overline{T_n}$, $\overline{Q_m}$, $\overline{Y_m}$ – середні багаторічні значення тривалості паводку або водопілля, максимальні витрати води за паводок або водопілля, шари стоку.

F – площа водозбору, км^2 .

Для визначення коефіцієнту часової нерівномірності схилового припливу необхідно узагальнити коефіцієнти нерівномірності руслового стоку по території з врахуванням площі водозборів і отримати верхнє граничне

значення $\frac{m+1}{m}$ при $F \rightarrow 0$, яке і буде дорівнювати коефіцієнту нерівномірності схилового припливу.

Тривалість схилового припливу (T_0) також визначається розрахунковим методом, користуючись генетичною формулою А.М. Бефані та базовою формулою максимального стоку (1). Таким чином, розрахункові рівняння тривалості схилового припливу (T_0) можна представити у вигляді:

- при $\frac{t_p}{T_0} < 1.0$

$$T_0 = \left\{ \frac{\varepsilon_F Y_m}{n q_m} \left[(n+1) T_0^n - \frac{m_1+1}{n+m_1+1} t_p^n \right] \right\}^{\frac{1}{n+1}}; \quad (4)$$

- при $\frac{t_p}{T_0} \geq 1.0$

$$T_0 = \left[\left(\frac{m_1+n+1}{n+1} - \frac{q_m}{Y_m \varepsilon_F} \right) \frac{m_1(n+m_1+1)}{n+1} t_p^{m_1} \right]^{\frac{1}{m_1}} \quad (5)$$

Коефіцієнт русло-заплавного регулювання ε_F визначається оберненим способом на одному з етапів розрахунку (T_0). Для спрощення розрахунку T_0 на кафедрі гідрології суші ОДЕКУ була розроблена програма "Caguar", за допомогою якої можливо проводити наведені вище розрахунки.

Результати досліджень

Першим етапом обґрунтування розрахункових параметрів формули (1) стало визначення шарів стоку весняних водопіль та дощових паводків рідкісної ймовірності перевищення. З цією метою виконана стандартна статистична обробка вихідних часових рядів за методами моментів та найбільшої правдоподібності. Отримані результати статистичної обробки шарів стоку весняних водопіль показали, що коефіцієнти варіації річок басейну р. Вісла, розраховані за методом моментів, коливаються від 0,43 (р.Полтва - с.Пельтев) до 0,77 (р.Західний Буг - м. Сокаль), а за методом найбільшої правдоподібності – від 0,44 (р.Полтва - с.Пельтев) до 0,81 (р.Західний Буг - м. Сокаль). Співвідношення C_s/C_v дорівнює 2,0.

В свою чергу, для дощових паводків розраховані за двома методами коефіцієнти варіації коливаються в більших межах, від 0,69 (р.Золочевка - с.Золочевка) до 1,41 (р.Західний Буг - м. Сокаль) за методом моментів, і від 0,74 (р.Золочевка - с.Золочевка) до 1,74

Для визначення трансформаційної функції використовуються розрахункові рівняння, які будуть відрізнятися залежно від співвідношення $\frac{t_p}{T_0}$:

- при $0 < \frac{t_p}{T_0} < 1.0$

$$\psi(t_p/T_0) = 1 - \frac{m_1+1}{(n+1)(m_1+n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n; \quad (6)$$

- при $\frac{t_p}{T_0} \geq 1$

$$\psi(t_p/T_0) = \frac{n}{n+1} \cdot \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m_1+1}{m_1} - \frac{n+1}{m_1(m_1+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p} \right)^{m_1} \right], \quad (7)$$

де n і m_1 – показники степені в рівнянні кривих схилового припливу та ізохрон;
 t_p – час руслового добігання, год;

Коефіцієнт зарегулювання максимального стоку озерами і водосховищами проточного типу r , а також коефіцієнт для переходу від 1% забезпеченості до інших забезпеченості (λ_p) розраховуються згідно рекомендацій нормативного документу СНіП 2.01.14-83[22].

(р.Західний Буг - м. Сокаль). Співвідношення C_s/C_v в цьому випадку дорівнює 2,5.

Для подальших розрахунків були обрані статистичні параметри, визначені за методом найбільшої правдоподібності, згідно з рекомендаціями СНіП 2.01.14-83, оскільки для більшості постів коефіцієнти варіації більші за 0,5 [22].

На базі отриманих характеристик кривих розподілу та застосовуючи три-параметричний гама-розподіл С.М.Крицького та М.Ф.Менкеля отримані шукані величини ($Y_{1\%}$, мм), окремо для весняного водопілля та дощових паводків, а також величини інших забезпеченостей ($P=3,5,10\%$). Розрахункові значення шарів стоку 1%-ої забезпеченості весняних коливаються від 73 мм (р. Шкло - м. Яворів, $F=236 \text{ км}^2$) до 168 мм (р. Західний Буг - смт.Сасів, $F=107 \text{ км}^2$) для весняних водопіль і від 38 мм (Стокід-с.Малинівка, $F=692 \text{ км}^2$) до 130 мм (р. Західний Буг – м. Сокаль, $F=6250 \text{ км}^2$).

Подальшою задачею є узагальнення за територією отриманих величин з метою

визначення $Y_{1\%}$ для невивчених у гідрологічному відношенні водозборів. В роботах авторів даного дослідження [23, 24] показано результати такого узагальнення з урахуванням впливу заболоченості, карти розподілу $Y_{1\%}$, при $f_6=0$, представлені на рис.2.

З метою визначення коефіцієнтів часової нерівномірності схилового припливу $(n+1)/n$ попередньо розраховані коефіцієнти часової нерівномірності руслового стоку

$(m+1)/m$, які для весняних водопіль коливаються незначно, від 1,85 до 5,36, а для дощових паводків – від 0,72 до 3,18. Побудована залежність $(m+1)/m = f(\lg(F+1))$, за допомогою якої визначено коефіцієнт нерівномірності руслового стоку (рис.3, 4). Для весняного водопілля $(n+1)/n = 7,38$, а $n = 0,16$, для дощових паводків відповідно $(n+1)/n = 3,94$, а $n = 0,34$.

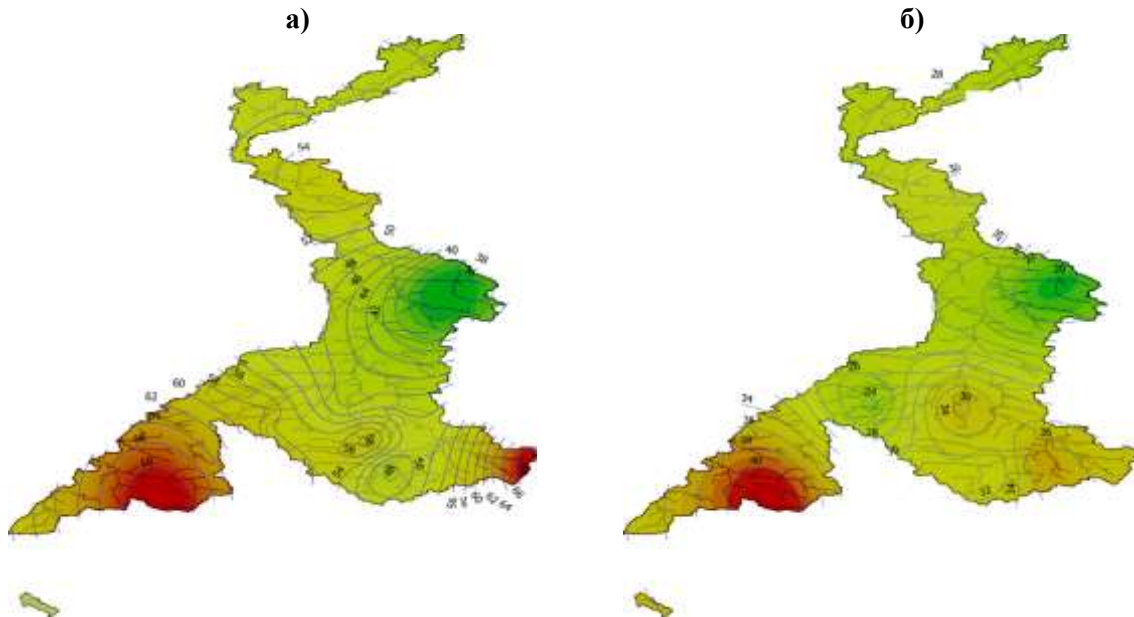


Рис. 2 – Просторовий розподіл шарів стоку $Y_{1\%}f_{6=0}$ весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) в басейні р. Вісла в межах України

Fig. 2 – Spatial distribution of runoff layers $Y_{1\%}f_{6=0}$ of spring floods (a) and rain floods (b) in the Vistula river basin within Ukraine

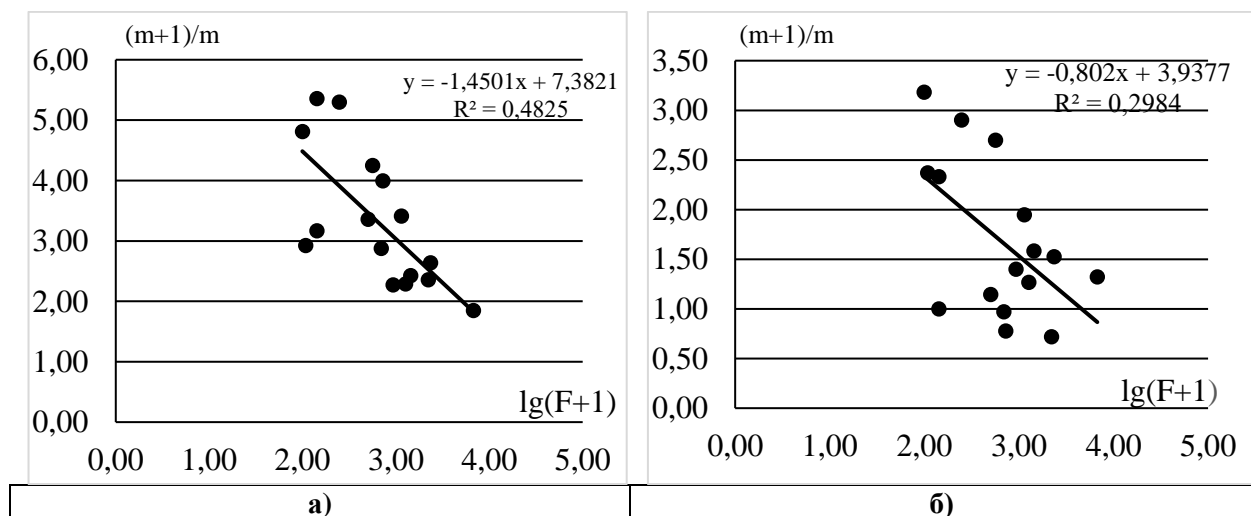


Рис. 3 – Залежність коефіцієнтів нерівномірності руслового припливу підчас весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) від площі водозбору р. Вісла в межах України

Fig. 3 – Dependence of the channel unevenness coefficient of spring flood (a) and rain flood (b) on the catchment area of Vistula River basin within Ukraine

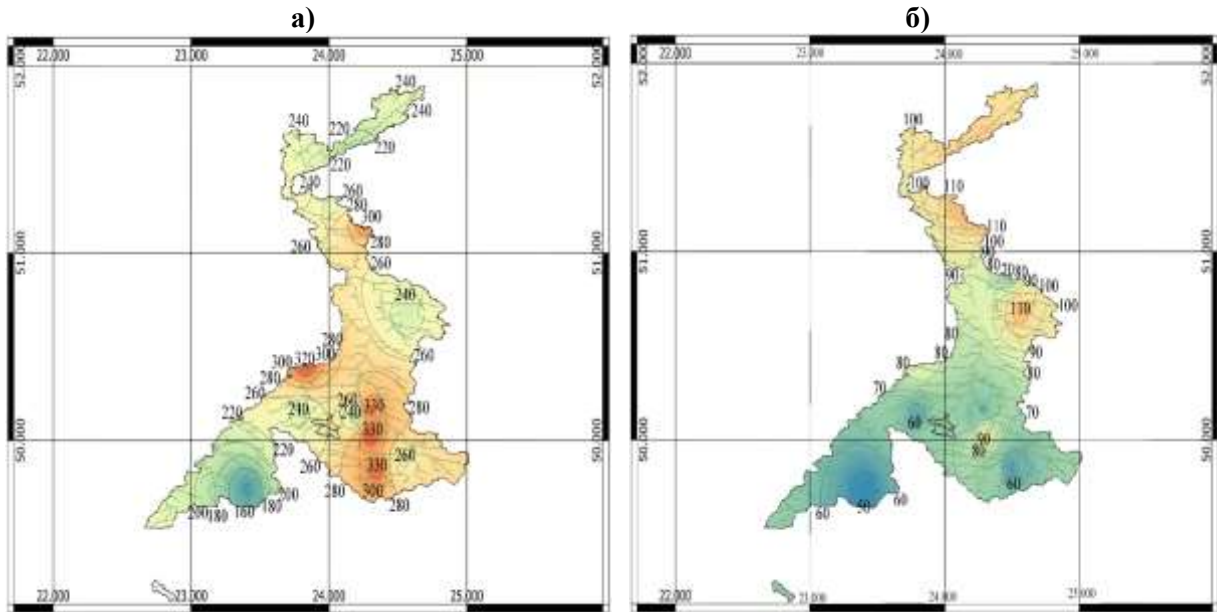


Рис. 4 – Просторовий розподіл тривалості схилового припливу під час весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) в басейні р. Вісла в межах України

Fig. 4 – Spatial distribution of the duration of the slope influx during spring floods (a) and rain floods (b) in the Vistula river basin within Ukraine

Тривалість схилового припливу T_0 була визначена за наведеною вище методикою за допомогою програми «Сагнар». Також як й шари стоку весняних водопілля та дощових паводків цей параметр розрахунковою методикою узагальнений за територією в вигляді карти ізоліній (рис.4).

Отже, маючи всі складові формули (2), розраховані максимальні модулі схилового припливу весняних водопілля і дощових паводків, які також подлягають просторовому узагальненню та представлені на рис. 5. Аналізуючи отриманий розподіл, слід відмітити, що найбільші величини $q'_{1\%}$ слід очікувати як для

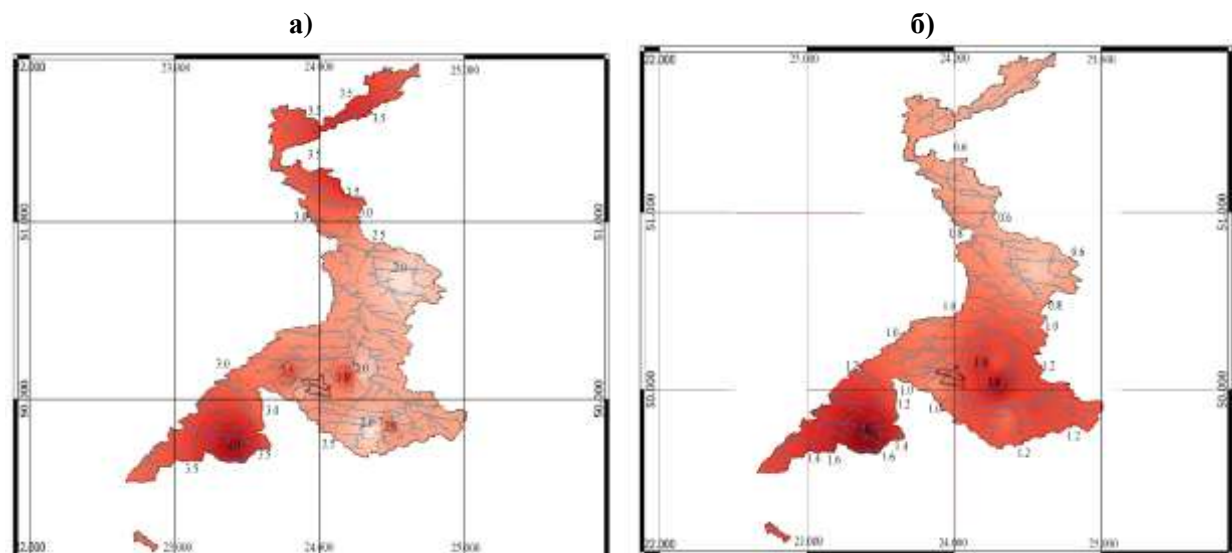


Рис. 5 – Просторовий розподіл максимальних модулів схилового припливу під час весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) в басейні р. Вісла в межах України

Fig. 5 – Spatial distribution of the slope influx module during spring floods (a) and rain floods (b) in the Vistula river basin within Ukraine)

весняних водопіль, так й для дощових паводків в суббасейні р.Сяну. Високі весняні водопілля також можливі на півночі досліджуваного басейну наряду з окремими локальними дощовими паводками в центральній частині.

Згідно з операторною моделлю формування максимального стоку, сформовані під час паводків та водопіль максимальні модулі схилового припливу надалі трансформуються русловою мережею за рахунок руслового добігання та русло заплавного регулювання.

Регіональна розрахункова формула для визначення трансформаційної функції в басейні р. Вісла, при $T_0 > t_p$, після підставлення отриманих розрахункових величин в рівняння (6), буде мати вигляд:

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1 - 0,75 \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^{0,2}; \quad (12)$$

Вплив русло-заплавного регулювання на максимальний стік визначається за допомогою коефіцієнта що являє собою функцію ε_F убутного вигляду (з верхнім граничним значенням $\varepsilon_F=1.0$, при $F \rightarrow 0$) із зростанням водозбірної площі. Розрахувати її можна зворотним шляхом з формули (1), як:

$$\varepsilon_F = \frac{q_m/q'_m}{\psi(t_p/T_0)}. \quad (13)$$

Редукція максимального модуля q_m/q'_m може бути описана рівнянням

$$q_m/q'_m = \frac{1}{(F+1)^{n_1}}. \quad (14)$$

Для визначення цього коефіцієнту вихідними даними є величини модуля схилового припливу q'_m , який розраховується за рівнянням (2). Отримані для всіх постів значення $\frac{q_{1\%}}{q'_m}$ в логарифмічних координатах на-

носяться на графік $\left(\frac{q_{1\%}}{q'_m}\right) = f(F)$. З рис. 6.

видно, що залежність добре виражена, а проведення лінії зв'язку спрощується тим, що залежність повинна виходити із $lg\left(\frac{q_{1\%}}{q'_m}\right) = 0$ при $lg(F+1) = 0$.

Так, для весняних водопіль степеневий показник склав 0,45, а для дощових паводків 0,59.

Таким чином, за допомогою рівняння (13) визначені розрахункові значення ε_F окремо для весняних водопіль та дощових паводків. Отримані величини узагальнені у вигляді їх залежності від площі водозборів (рис.7). Для визначення коефіцієнтів русло-заплавного регулювання невивчених річок досліджуваної території рекомендується використовувати представлені на графіках розрахункові рівняння.

Завершальним етапом роботи став розрахунок максимальних модулів стоку $q_{1\%}$ для дощових паводків та весняних водопіль за формулою (1). Отримані значення $q_{1\%}$ для весняного водопілля коливаються в межах

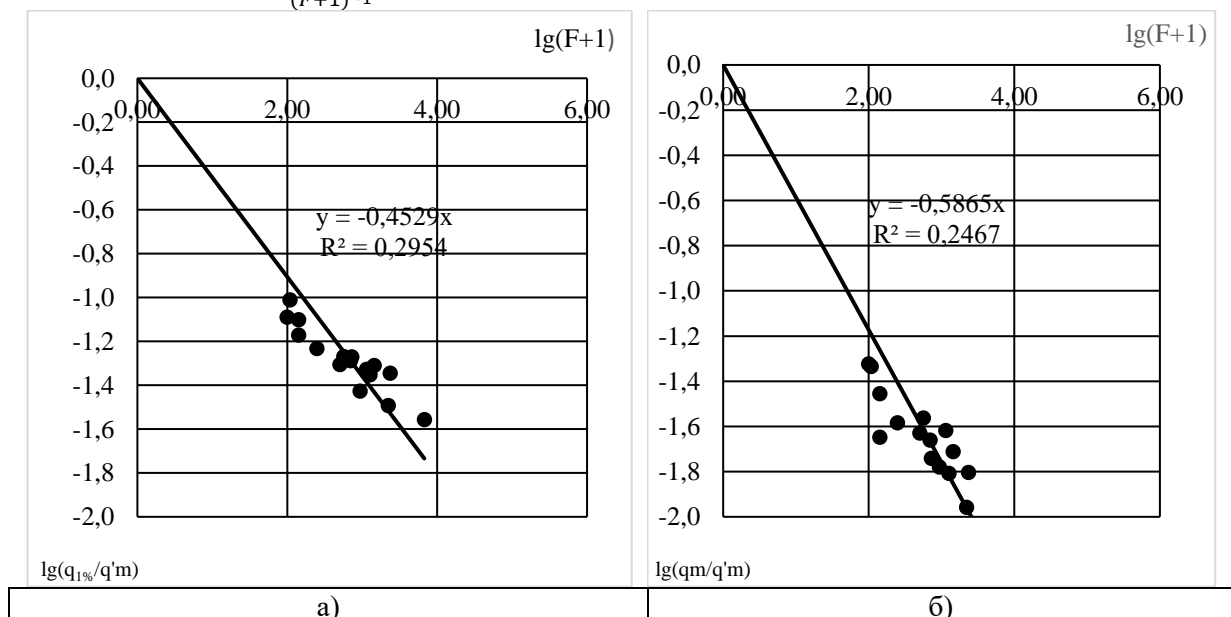


Рис. 6 – Залежність відношення $lg(q_m/q'_{1\%})$ для весняних водопіль (а) та дощових паводків (б) від площі водозбору для річок басейну р. Вісла в межах України

Fig. 6 – Dependence of the $lg(q_m/q'_{1\%})$ ratio for spring (a) and rain flood (b) on the catchment area of Vistula river basin within Ukraine

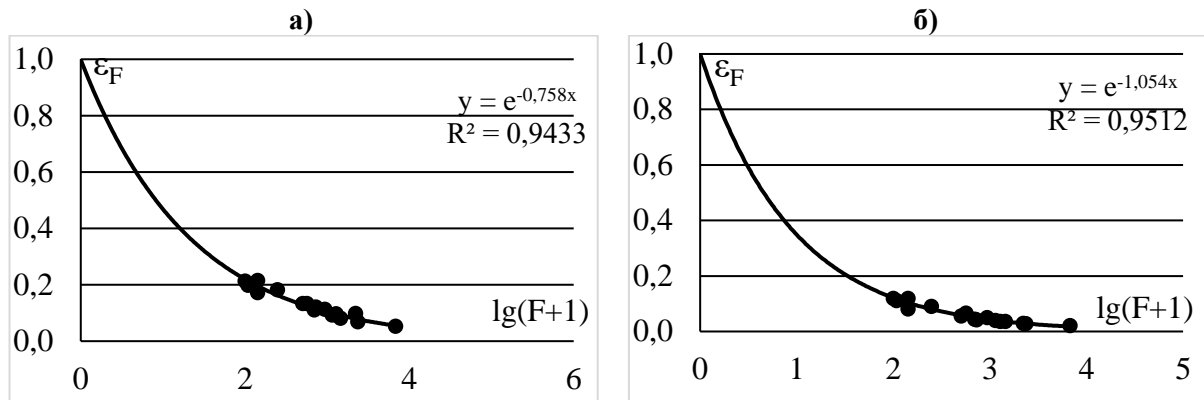


Рис. 7 – Залежність коефіцієнтів русло-заплавного регулювання ε_F в період весняного водопілля (а) та дощових паводків (б) від площі водозбору для річок басейну р. Вісла в межах України

Fig. 7 – Dependence of the flood-plain regulation coefficient ε_F during spring (a) and rain (b) flood on the catchment area of Vistula river basin within Ukraine

0,04 м³/(с · км²) (р. Західний Буг – с. Литовеж) до 0,37 м³/(с · км²) (р. Західний Буг – смт. Сасів), і від 0,01 м³/(с · км²) (р. Західний Буг – с. Литовеж) до 0,1 м³/(с · км²) (р. Кам'янка - м. Кам'янка-Бузька) – для дощових паводків.

З метою оцінки методики розрахунку максимальних модулів стоку виконані перевірені розрахунки. Точність розрахунку оцінювалася за середнім відносним відхиленням між розрахованими і фактичними значеннями за формулою

$$|\Delta| = \frac{|q_{m_p} - q_{m_\phi}|}{q_{m_\phi}} \cdot 100\%, \quad (15)$$

де q_{m_ϕ} – величина максимального модуля стоку весняного водопілля або дощових

паводків, що визначена за даними статистичної обробки.

q_{m_p} – модуль стоку, розрахований за наведеною вище методикою.

Для весняного водопілля розраховане значення $|\Delta| = \pm 24,3\%$, а для дощових паводків $|\Delta| = \pm 20,1\%$. Такі результати відповідають точності вихідної інформації по максимальному стоку річок ($\pm 20\%$) та дозволяють рекомендувати операторну модель для визначення максимальних модулів стоку та максимальних модулів схилового припливу весняного водопілля і дощових паводків в басейні р. Вісла в межах України при відсутності спостережень за стоком.

Висновки

Аналіз сучасних літературних джерел та статистичної інформації про збитки від повеней за останні роки показує актуальність дослідження максимального стоку річок, як для території України, так й за її кордонами;

Досліджувана територія басейну р. Вісла недостатньо добре охоплена мережею гідрологічних спостережень, що потребує розробки методик визначення характеристик стоку для невивчених в гідрологічному відношенні річок;

В якості базової для визначення максимального стоку обрана операторна модель формування стоку, яка пройшла апробацію на більшості річок України;

В результаті дослідження розроблена регіональна методика для визначення макси-

мального стоку весняних водопілля і дощових паводків на річках басейну р. Вісли.

На відміну від попередніх розробок вітчизняних авторів, перевагою є те, що використання операторної моделі дозволяє використовувати єдину формулу, незалежно від генезису максимального стоку та площі водозборів.

Отримані результати дослідження можуть бути використані при плануванні гідротехнічного будівництва та протипаводкових заходів в басейні р. Вісла в межах України з метою мінімізації збитків та захисту населення від небезпечної дії вод. Запропонована модель може бути використана і для інших територій.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагиат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Economic Losses, Poverty & Disasters: 1998-2017 : technical report centre for Research on the Epidemiology of Disasters. Brussels : CRED. 2018. 33 pp. URL: https://www.preventionweb.net/files/61119_credeconom-iclosses.pdf
2. EEA: Economic losses from climate-related extremes, Copenhagen, Denmark, 2018. Natural Disasters 2019. Brussels : CRED. 2019. 17 pp. URL: https://emdat.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf
3. Di Baldassarre, G. Floods in a Changing Climate: Inundation Modelling (International Hydrology Series). Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 103 pp. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139088411>
4. Dottori, F., Szewczyk, W., Ciscar, J.-C., Zhao, F., Alfieri, L., Hirabayashi, Y., Bianchi, A., Mongelli, I., Frieler, K., Betts, R. A., Feyen, L. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. *Nature Climate Change* 2018. № 8. P. 781-786. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z>
5. IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems / P.R. Shukla, et al. In press. 2019. 41 pp. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>
6. Wobus C., Lawson M., Jones R., Smith J., Martinich J. Estimating monetary damages from flooding in the United States under a changing climate. *Journal of Flood Risk Management*. 2013. Vol.7, Issue 3. P. 217–229. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12043>
7. Методики гідрографічного та водогосподарського районування території України відповідно до вимог Водної рамкової директиви Європейського Союзу / В.В. Гребінь, В.Б. Мокін, В.А. Сташук, В.К. Хільчевський та ін. Київ. : Інтерпрес ЛТД, 2013. 55 с.
8. Гопченко Є. Д., Овчарук В. А., Шакирзанова Ж. Р. Розрахунки та довгострокові прогнози характеристик максимального стоку весняного водопілля в басейні р. Прип'ять : монографія. Одеса : Екологія, 2011. 336 с.
9. Гопченко Є.Д., Кічук Н.С., Овчарук В.А. Максимальний стік дощових паводків на річках Півдня України : монографія. Одеса : ТЕС, 2016. 212 с.
10. Гопченко, Є. Д., Бурлуцька, М. Е., Романчук, М. Є., Мартинюк, М.О. Сучасні методи дослідження максимального стоку весняних водопіль і дощових паводків річок України *Науковий вісник Херсонського державного університету. серія «Географічні науки»*. 2019. Вип. 10. С. 114-118.
11. Овчарук В.А. Максимальний стік весняного водопілля рівнинних річок України : монографія. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 300 с.
12. Огиевский А. В. Гидрология суши. Москва : Сельхозгиз, 1952. 516 с.
13. Железняк И. А. Определение максимального расхода половодья по типовым характеристикам гидрометеорологических условий водосбора : труды УкрНИГМИ. Киев, 1985. Вып. 201. С. 15-27.
14. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ : Ніка-Центр, 2010. 316 с.
15. Вишневський В.І. Максимальні витрати води на річках Українських Карпат : труды УкрНДГМІ. Київ, 1999. Вип. 247. С. 102–113.
16. Gorbachova L., Prykhodkina V., Khrystiuk B. Spring flood frequency analysis in the Southern Buh River Basin, Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2021. Vol. 30 (2). P. 250-260. <https://doi.org/10.15421/112122>
17. Горбачова Л.О., Приходькіна В.С., Христюк Б.Ф., Заболотня Т.О., Розлач В.О. Статистичний аналіз максимального стоку води річки Південний Буг за методом «Indicators of Hydrologic Alteration». *Український гідрометеорологічний журнал*. 2021. № 27. С. 42-54. DOI: <https://doi.org/10.31481/uhmj.27.2021.05>
18. Розлач В. О. Дослідження умов формування дощових паводків у басейні Вісли (у межах України) та розроблення системи прогнозування максимального стоку на засадах математичного моделювання : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.07. Київ : Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка, 2013. 22 с.
19. Гопченко Е. Д., Романчук М. Е. Нормирование характеристик максимального стока весеннего половодья на реках Причерноморской низменности. Киев : КНТ, 2005. 148 с.

20. Овчарук В. А., Гопченко Є. Д. Сучасна методика нормування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок України. *Український географічний журнал*. 2018. № 2 (102). С. 26-33. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2018.02.026>
21. Андреевская Г. М., Гопченко Е. Д., Овчарук В. А. О форме графиков притока воды со склонов в русловую сеть. *Метеорология, климатология и гидрология*. 1996. Вып. 33. С. 106-110
22. СНІП 2.01.14-83. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. [Чинний від 1984-07-01]. Ленинград : Государственный гидрологический институт, 1984. 447 с.
23. Martyniuk M., Ovcharuk V. Study of the influence of zonal and azonal factors on the maximum floods runoff in the Vistula basin (within Ukraine). *Earth system changes and Baltic Sea coasts* : Conference Proceedings International Baltic Earth Secretariat Publication No. 18. Jastarnia, 2020. 209 p.
24. Мартинюк М.О., Овчарук В.А. Визначення характеристик максимального стоку рідкісної ймовірності перевищення в басейні р. Вісла в межах України. *Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування*: матеріали VIII міжнар. наук. конф. молодих вчених (м. Харків, 26-27 листопада 2020 р.). Харків, 2020. С. 229–231.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2021

Рекомендована до друку 20.12.2021

V. A. OVCHARUK¹, DSc (Geography),

Director of the Hydrometeorological Institute

e-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5654-3731>

M. O. MARTYNIUK¹

Postgraduate Student of the Department of Land Hydrology

e-mail: martyniuk0904@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1332-4907>

¹Odesa State Environmental University,

15, Lvivska st., 65016, Odesa, Ukraine

APPLICATION OF THE OPERATOR MODEL FOR DETERMINATION OF MAXIMUM MODULUS OF SPRING AND RAIN FLOODS AT THE RIVERS WITHIN VISTULA RIVER BASIN INSIDE UKRAINE

Purpose. To substantiate the calculated characteristics of the slope influx and channel runoff, as well as to create a modern methodological basis for rationing the characteristics of the maximum runoff of spring and rain floods in the Vistula River basin within Ukraine.

Methods. For calculating the maximum runoff of spring and rain floods, statistical processing of data series was performed according to the method of moments and the maximum likelihood method. The three-parametric gamma distribution was used to calculate the runoff layers and water discharges with a rare probability of exceeding. An operator model developed by E.D. Gopchenko (2001) and modified by V.A. Ovcharuk (2017) was used as a calculation to determine the characteristics of the maximum river runoff. To calculate the duration of the slope influx, a complex method was used using the software complex "Caguar", developed at the Department of Land Hydrology of OSENU.

Results. The standard statistical characteristics of the time series of the maximum runoff of spring and rain floods are determined, they were used in further calculations to determine the maximum water runoff and runoff layers with a rare probability of exceeding. The paper substantiates and generalizes on the territory all parameters of the basic operator model of maximum runoff formation: coefficients of time non-uniformity of slope influx and duration of slope influx are determined, transformation function is calculated and maximum modules of slope influx for spring and rain floods are determined. Most of the calculated parameters are generalized by territory using GIS or calculation equations with the minimum amount of required input data.

Conclusions. As a result of the study, a regional methodology was developed to determine the maximum runoff of spring and rain floods on the rivers of the Vistula River basin. In contrast to previous developments by domestic authors, the advantage is that the use of the operator model allows the use of a single formula, regardless of the genesis of the maximum runoff and catchment area. The obtained results of the research can be used in the planning of hydraulic engineering construction and flood control measures in the Vistula River basin within Ukraine in order to minimize losses and protect the population from the dangerous effects of water. The proposed model can be used for other areas

KEYWORDS: maximum runoff, slope influx, spring floods, rain floods

References

1. *Economic Losses, Poverty & Disasters: 1998-2017*: technical report. (2018). Brussels: CRED. Retrieved from https://www.preventionweb.net/files/61119_credeconomiclosses.pdf
2. *EEA: Economic losses from climate-related extremes, Copenhagen, Denmark, 2018*. (2019). Natural Disasters 2019. Electronic resource: report. Retrieved from https://emdat.be/sites/default/files/adsr_2019.pdf
3. Di Baldassarre, G. (2012). *Floods in a Changing Climate: Inundation Modelling (International Hydrology Series)*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139088411>
4. Dottori, F., Szewczyk, W., Ciscar, J.-C., Zhao, F., Alfieri, L., Hirabayashi, Y., Bianchi, A., Mongelli, I., Frieler, K., Betts, R. A. & Feyen, L. (2018). Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming. *Nature Climate Change* 8, 781-786. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0257-z>
5. Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V.,... J. Malley, (Eds.). (2019). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/11/SRCCL-Full-Report-Compiled-191128.pdf>
6. Wobus C., Lawson M., Jones R., Smith J., Martinich J. (2013). Estimating monetary damages from flooding in the United States under a changing climate. *Journal of Flood Risk Management*, 7, 217–229. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12043>
7. Hrebin V.V., Mokin, V.B., Stashchuk, V.A., Khilchevskiy, V.K., Yatsiuk, M.V., Chunarov, O.V., Kryzhanovskiy, Ye.M., Babchuk, V.S., Yaroshevych, O.Ie. (2013). *Methods of hydrographic and water management zoning of the territory of Ukraine in accordance with the requirements of the Water Framework Directive of the European Union*. Kyiv: Interpres LTD. (In Ukrainian).
8. Gopchenko, E.D., Ovcharuk, V.A. & Shakirzanova, Zh.R. (2011). *Calculations and long-term forecasts of the characteristics of the maximum runoff of spring water in the Pripyat river basin*. Odesa: Ekolohiya. (in Ukrainian)
9. Gopchenko, E.D., Kichuk, N.S., Ovcharuk, V.A. (2016). *Maximum runoff of rain floods on the rivers of the South of Ukraine*: monograph. Odesa: TES (In Ukrainian).
10. Gopchenko, E.D., Burlutska, M.E., Romanchuk, M.E., Martyniuk, M.O. (2019). Modern methods of studying the maximum runoff of spring floods and rain floods of rivers of Ukraine. *Scientific Bulletin of Kherson State University, "Geographical Sciences"*, 10. (In Ukrainian).
11. Ovcharuk, V.A. (2020). *Maximum runoff of spring floods of plain rivers of Ukraine*: monograph. Odesa : Helvetica. (In Ukrainian)
12. Ogievskiy, A.V. (1952). *Hydrology of land*. Moscow: Selkhozgiz. (in Russian)
13. Zheleznyak, I.A. (1985). *Determination of the maximum discharge of floods according to typical characteristics of hydrometeorological conditions in the catchment area*. Proceedings UkrSRHMI, 201, 15-27. (in Russian)
14. Hrebin, V.V. (2010). *Modern water regime of rivers of Ukraine (landscape and hydrological analysis)*. Kyiv: Nika-Center. (In Ukrainian).
15. Vyshnevskiy, V.I. (1999). *Maximum water discharges on the rivers of the Ukrainian Carpathians*. Proceedings UkrSRHMI Kyiv, 247, 102–113. (in Ukrainian)
16. Gorbachova, L., Prykhodkina, V., Khrystiuk, B. (2021). Spring flood frequency analysis in the Southern Buh River Basin, Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30, 250-260. <https://doi.org/10.15421/112122>
17. Gorbachova, L. O., Prykhodkina, V. S., Khrystiuk, B. F., Zabolotnia, T. O., & Rozlach, V. O. (2021). Statistical analysis of maximum runoff of the Southern Buh River using the method of 'Indicators of Hydrologic Alteration'. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 27, 42-54. <https://doi.org/10.31481/uhmj.27.2021.05>
18. Rozlach, V. O. (2013). *Research of conditions of formation of rain floods in the Vistula basin (within Ukraine) and development of the system of forecasting of the maximum runoff on the basis of mathematical modeling*. Extended abstract of candidate's thesis : 11.00.07. Kyiv. (In Ukrainian).
19. Gopchenko, E.D., Romanchuk, M.E. (2005). *Normalization of the characteristics of the maximum spring flood runoff on the rivers of the Black Sea lowland*. Kiev: KNT. (in Russian)
20. Ovcharuk, V.A., Gopchenko, E.D. (2018). The modern method of maximum spring flood runoff characteristics valuation for the plain rivers of Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, 2, 26-33. <https://doi.org/10.15407/ugz2018.02.026> (in Ukrainian)
21. Andreevskaya, G.M., Gopchenko, E.D., Ovcharuk, V.A. (1996). About the form of graphs of water inflow from the slopes to the channel network. *Meteorology, climatology and hydrology*, 33, 106-110. (in Russian)
22. *SNiP 2.01.14-83. Manual for the determination of calculated hydrological characteristics*. (1984). State Hydrological Institute. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian).
23. Martyniuk, M., Ovcharuk, V. (2020). *Study of the influence of zonal and azonal factors on the maximum floods runoff in the Vistula basin (within Ukraine)*. International Baltic Earth Secretariat Publication, 18, 209.

24. Martyniuk, M., Ovcharuk, V. (2020). Determining the characteristics of the maximum runoff of the rare probability of exceeding the Vistula River basin within Ukraine. *Ecology, neo-ecology, environmental protection and sustainable use of nature: proceedings VIII international. science. conf. young scientists*. Kharkiv, 229–231. (In Ukrainian).

The article was received by the editors 21.10.2021

The article is recommended for printing 20.12.2021

В. А. ОВЧАРУК¹, д-р географ. наук, доц.,

директор научно-учебного гидрометеорологического института

e-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5654-3731>

М. О. МАРТЫНЮК¹

аспирант кафедры гидрологии суши

e-mail: martyniuk0904@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1332-4907>

¹Одесский государственный экологический университет,

ул. Львовская, 15, г. Одесса, Украина, 65016

ПРИМЕНЕНИЕ ОПЕРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ СТОКА ВЕСЕННИХ ПОЛОВОДИЙ И ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ РЕК БАСЕЙНА ВИСЛЫ В ПРЕДЕЛАХ УКРАИНЫ

Цель. Обоснование расчетных характеристик склонового притока и руслового стока, а также в создание современной методической базы для нормирования характеристик максимального стока весенних половодий и дождевых паводков в бассейне р. Висла в пределах Украины.

Методы. При расчетах максимального стока весенних половодий и дождевых паводков выполнялась статистическая обработка рядов данных методами моментов и наибольшей правдоподобности. Три-параметрическое гамма-распределение использовано для расчета слоев стока и расхода воды редкой вероятности превышения. В качестве расчетной для определения характеристик максимального стока рек принята операторная модель, разработанная Гопченко Е.Д. (2001) и усовершенствованная Овчарук В.А. (2017). Для расчета продолжительности склонового притока использован комплексный метод с использованием программного комплекса «Сагуар», разработанного на кафедре гидрологии суши ОГЭКУ.

Результаты. Определены стандартные статистические характеристики временных рядов максимального стока весенних половодий и дождевых паводков, которые использованы в дальнейших расчетах для определения максимальных расходов воды и слоев стока редкой вероятности превышения. В работе обоснованы и обобщены по территории все параметры базовой операторной модели формирования максимального стока: определены коэффициенты временной неравномерности склонового притока и длительность склонового притока, рассчитана трансформационная функция и определены максимальные модули склонового притока для дождевых паводков и весенних половодий. Большинство расчетных параметров обобщены по территории с использованием ГИС-технологий или расчетных уравнений с минимальным количеством необходимых исходных данных.

Выводы. Разработана региональная методика определения максимального стока весенних половодий и дождевых паводков на реках бассейна г. Вислы. В отличие от предыдущих разработок отечественных авторов, преимуществом является то, что использование операторной модели позволяет использовать единую формулу независимо от генезиса максимального стока и площади водосборов. Полученные результаты исследования могут быть использованы при планировании гидротехнического строительства и противопаводковых мероприятий в бассейне г. Висла в пределах Украины с целью минимизации ущерба и защиты населения от опасного воздействия вод. Предлагаемая модель может быть использована и для других территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: максимальный сток, склоновый приток, весенние половодья, дождевые паводки

Статья поступила в редакцию 21.10.2021

Рекомендована в печать 20.12.2021