

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 556.166

Є. Гопченко, д-р геогр. наук, проф.,
E-mail: gidro@odeku.edu.ua
В. Овчарук, д-р геогр. наук, доц.,
E-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com
Ж. Шакірзанова, д-р геогр. наук, проф.,
E-mail: jannettodessa@gmail.com
М. Гопцій, канд. геогр. наук,
E-mail: Goptsiy-odeky@ukr.net
А. Траскова, канд. геогр. наук,
E-mail: knopka210689@gmail.com
Н. Швець, наук. співроб., E-mail: Natzin@ukr.net
З. Сербова, наук. співроб., E-mail: Natzin@ukr.net
О. Тодорова, канд. геогр. наук,
E-mail: lenochka.todorova1989@gmail.com
Одеський державний екологічний університет
Гідрометеорологічний інститут
вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНО ВИСОКИХ ПАВОДКІВ НА ПРИКЛАДІ ГІРСЬКИХ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

(Рекомендовано членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Іванік)

В умовах сучасних змін клімату як в Україні, так і у світі загалом, суттєво підвищується імовірність настання екстремальних гідрологічних явищ, зокрема катастрофічних паводків різного походження. Аналіз розподілу території України визначних паводків і водопіль показав, що переважна кількість руйнівних паводків припадає на найбільш паводконебезпечний район – Українські Карпати, де паводки є характерною рисою гідрологічного режиму річок. Паводки, які спостерігаються на річках Гірського Криму також, в окремі роки носять катастрофічний характер. Для визначення розрахункових витрат води в період паводків на гірських річках України авторами пропонується науково-методична база, яка ґрунтується на сучасних наукових досягненнях у галузі теоретичної та прикладної гідрології. Принципово новим у запропонованій моделі є відокремлення факторів формування і трансформації паводкового стоку на схилах і в русловій мережі. Обґрунтовані підходи до просторового узагальнення розрахункових параметрів; стосовно невимірюваних характеристик паводків розроблена й доведена до практичного застосування методика чисельного вирішення задачі. У результаті отримано чисельні значення основних складових схилового припливу – шари стоку за паводок 1%-ї забезпеченості та тривалість схилового припливу, які узагальнені за територією з урахуванням впливу інтразональних та азонанальних факторів (залісненості й середньої висоти водозборів і карсту); а також коефіцієнти його часової нерівномірності, які осереднені в межах досліджуваних регіонів. Процес трансформації схилового припливу в русловий стік описаний за допомогою трансформаційних функцій, які враховують час руслового добігання та русло-заплавне регулювання. Точність визначення максимальних модулів стоку 1%-ї ймовірності перевищення знаходиться на рівні точності вихідної інформації, що дозволяє рекомендувати запропоновану методику для практичного використання з метою підвищення рівня обґрунтувань проектів і заходів за умов господарювання на гірських територіях Криму та Карпат.

Ключові слова: науково-методична база, максимальний стік, дощові паводки, гірські річки.

Вступ. У більшості районів земної кулі повені зумовлюються тривалими інтенсивними дощами і зливами у результаті проходження циклонів. Зливові паводки – найбільш поширений тип повеней, вони можливі повсюдно, навіть у напівпустелях і пустелях, за винятком Арктики й Антарктиди.

Головним чинником формування стоку, як відомо, є клімат, але підстильна поверхня, зокрема, значні форми рельєфу суттєво на нього впливають. Повітряні течії затримуються і відхиляються хребтами, а метеорологічні фронти – деформуються. У вузьких проходах між хребтами змінюється швидкість повітряних течій, виникають місцеві гірсько-долинні вітри. Над різноорієнтованими схилами створюються неоднакові умови нагрівання та охолодження, а тому різні режими температури повітря, ґрунтів. У зв'язку з перетіканням повітряних течій через хребти на навітряних схилах гір, особливо в більш низьких і вузьких сідловинах, перевалах, утворюються умови для збільшення хмарності та опадів. На підвітряних схилах, навпаки, виникають фени – вітри з більш високою температурою і низькою вологістю повітря. Над нагрітими схилами гір збільшується конвекція повітря, а отже, хмароутворення. У результаті цих процесів гірські регіони України є найбільш паводконебезпечними територіями нашої країни.

Відомості про визначні паводки в Карпатах та Криму досить численні й більш-менш систематизовані у цілому ряді періодичних видань в галузі гідрології (Каганер,

1969; Айзберг і Каганер, 1966). У силу паводкового режиму річок Карпат то в одній, то в іншій частинах регіону практично щорічно формуються паводки, які за своїми розмірами наближаються і навіть перевищують історичні, наприклад, паводки 1998, 2001 та 2008 років (Бойко і Петренко, 2006). Із цієї причини спеціалістами періодично проводиться уточнення ймовірнісних характеристик виняткової повторюваності.

Постановка проблеми. Науково-методична база у галузі розрахунку характеристик максимального стоку в зарубіжних країнах головним чином ґрунтується на узагальненні експериментальних матеріалів спостережень з використанням теоретичних моделей, заснованих на геометричній схематизації гідрографів стоку паводків і водопіль. Так, У. Раффа (Раффа, 1969) використовував редуційну формулу для розрахунку максимального стоку річок Італії. Дана формула дуже схожа на ту, яка пропонується у нормативному документі СНиП 2.01.14-83 (Шмидт, 1984). До формул об'ємного типу можна віднести структуру, яка була розроблена у Франції для річок Центральної та Південно-Західної Африки (Соколов і др., 1978) для розрахунку максимального стоку ймовірністю перевищення $P=10\%$ (для річок із площею водозборів $F<200 \text{ км}^2$). Також у багатьох країнах світу отримала широке використання формула граничної інтенсивності стоку для невеликих водозборів ($F<50 \text{ км}^2$). Цей метод викладено у ряді наукових робіт (Алексєєв, 1966; Chow, 1964). З іншого боку, у закордонній практиці поши-

реними є формули паводків, які враховують опади, а також деякі фізичні характеристики басейну. Основною для цього типу є так звана раціональна формула (Линслей і др., 1962). Недоліки таких спрощених підходів полягають у неможливості здійснювати на їхній структурній базі можливі часові тренди, обумовлені, наприклад, кліматичними змінами або, навіть, господарською діяльністю. Застосування ж методів, огинаючих експериментальні дані залежностей, не враховує причинно-наслідкових особливостей багатфакторних процесів формування річкового стоку на окремих водозборах.

На сучасному етапі напрями досліджень провідних закордонних вчених в основному пов'язані з розробкою чисельних концептуальних моделей формування річкового стоку. Наприклад, Модель HBV, розроблена Бергстромом (Bergstorm, 1992; Bergstorm, 1995) у Шведському інституті метеорології і гідрології (SMHI) є концептуальною, тобто вона перетворює опади, температуру повітря і потенційне сумарне випаровування або в сніготанення, або у стік із водозбору чи приплив у водосховище. Модель була неодноразово модифікована, а її різні версії існують у багатьох країнах (Beldring et al., 2003; SNA, 1995). У подальшому в результаті співпраці між університетами штату Орігон, Упсали та Стокгольма, а також SMHI модель була модифікована й отримала назву (HBV Light), при цьому вона була перепрограмована з мови програмування VB6 у VB.NET (Hughes and Metzler, 1995). Цей модифікований варіант успішно використовується як у європейських країнах (Швеція, Німеччина, Швейцарія та ін.), так і у США (Seibert and Vis, 2012).

Поряд з пакетами програмного забезпечення, розробленими в Європі й Північній Америці, усе ширше використовуються в міжнародному контексті деякі продукти з інших країн.

Так, у Китаї в 60-х–70-х рр. минулого століття було запропоновано низку концептуальних моделей з напіврозподіленими параметрами. До них можна віднести модель XAJ (Zhao et al., 1980), запропоновану в 1973 р. для прогнозу надходження припливу до водосховища Синьнянцзян, модель NS, яка розроблена в 1964–1966 рр. професором Рендзюнь Чжао, модель MIX (Bao et al., 2014). В одному із останніх досліджень китайських вчених (Kan et al., 2017) представлені результати сумісного використання всіх згаданих моделей із застосуванням методу оптимізації SCE-UA, запропонованого Дуанем в Університеті Арізони (Duan et al., 1994). Результати сумісного використання згаданих вище моделей такі: усі вони добре працюють у зволжених районах Китаю; моделі, що враховують механізм утворення надлишкового стоку за рахунок перенасичення підстильної поверхні вологою, добре працюють у напіввологих та напівпосушливих водозборах, і лише модель NS може дати прийнятні результати у посушливих водозборах. Модель MIX, яка може генерувати інфільтраційний надлишок поверхневого стоку, перевершує модель XAJ на основі надмірного насичення у посушливих регіонах. Загалом результати моделювання вказують на те, що прогнозування повеней у напіввологих, напівпосушливих і посушливих районах усе ще є складним і все ще не вирішено (Kan et al., 2017).

У роботах 1990-х рр. (Sajikuma and Thandaveswara, 1999; Tokar et al., 2000) величезний інтерес був проявлений до особливого класу математичних моделей – штучні нейронні мережі, які все частіше використовуються як альтернативний спосіб вирішення широкого діапазону гідрологічних завдань. Цей підхід можна розглядати як інструмент моделювання, що складається із так званих штучних нейронів, які являють собою декілька взаємопов'язаних одиниць обробки сигналу. Однак на постійній

основі у гідрологічній практиці ці методи поки не використовуються, оскільки перевага віддається все ж традиційним технологіям, а не новим, які ще не мають достатньої апробації.

Щодо моделювання впливу глобальних коливань клімату на гідрологічні явища, то здебільшого розглядаються головним чином інтегральні складові водних балансів (опади, випаровування, стік), які не дають змоги вирішувати питання, пов'язані з направленими змінами екстремальних характеристик паводків, водопіль, посух. Проте нещодавно під керівництвом проф. Г. Блошля (Blöschl et al., 2017) для території Європи у 2016–2017 рр. виконано масштабну роботу з дослідження тенденцій багаторічних змін у часових рядах максимального стоку.

В Україні також структура значної кількості відомих методів розрахунку максимального стоку через складну взаємодію факторів, які суттєво впливають на характеристики весняного водопілля та дощових паводків, не є оптимальною. Нормативний документ СНиП 2.01.14-83 (Шмидт, 1984), що застосовується в інженерних розрахунках, не можна визнати достатньо надійним, оскільки в ньому використані формули, які не повною мірою враховують основні стокоформуючі фактори й особливості їхнього спільного впливу на максимальний стік (Гопцій і Гопченко, 2009).

В Одеському державному екологічному університеті протягом багатьох років існує та успішно розвивається наукова школа "Теоретичної і прикладної гідрології" (Gorchenko et al., 2015), яка своїм основним напрямом має саме дослідження процесів формування катастрофічних паводків і весняних водопіль. Залежно від природних умов запропоновано декілька теоретичних субмоделей, на підставі яких можливе побудування нормативно-розрахункових методик у галузі максимального стоку.

Отже, на практиці, у більшості країн світу басейни річок або не охоплені мережею гідрометричних спостережень, або охоплені не належною мірою. Водночас, у світі, який стає все більш заселеним, попит на воду в розрахунку на душу населення постійно зростає, навантаження на водні ресурси зростає також. У зв'язку з цим загострюється потреба у даних спостереженнях, а також методиках, які дають змогу розрахувати об'єм водних ресурсів за відсутності даних стаціонарних спостережень за стоком річок.

Об'єкт та матеріали дослідження. Для обґрунтування розрахункової методики створено базу вихідних даних по максимальному дощовому стоку річок досліджуваної території по 147 гідрологічних станціях і постах Державної мережі Гідрометслужби України, із них 93 у межах території Українських Карпат та 54 – Гірського Криму.

Важливим показником гідрологічної вивченості території є тривалість стокових спостережень на річках. На досліджуваній території вона становить для річок Українських Карпат від 16 (р. Ріка – с. Нижній Бистрий) до 99 (р. Прут – м. Чернівці) років, а для річок Криму – від 17 (р. Альма – с. Карагач) до 82 років (р. Су-Індол – с. Тополівка). Діапазон коливання площ водозборів від 18,1 (р. Кам'янка – с. Дора) до 9140 км² (р. Тиса – смт Вилोक) для річок Українських Карпат та від 0,32 км² (б. Скеляста – с. Міхріччя) до 3540 км² (р. Салгир – с. Листв'яне) – для річок Криму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині існує досить велика кількість авторських розробок з розрахунку максимального паводкового стоку на гірських річках, зокрема, Карпат та Криму, які у різні роки пропонувалися тими чи іншими авторами, що зайвий раз підкреслює специфіку регіонів, які відносяться до найбільш паводкобезпечних в Україні. Проведений аналіз методів розрахунку максимального стоку дощових паводків річок Карпат та Криму свідчить про те, що багатьом із них,

включаючи і нормативні документи, властиві ті або інші хиби, насамперед структурні. Наслідком цієї обставини є деяка умовність параметрів, що їх описують. У першу чергу це стосується всіх формул редукційного й об'ємного типів, а також формул граничної інтенсивності. Найбільше теоретично обґрунтованою із числа наявних для розрахунку максимальних витрат дощових паводків необхідно визнати методику, розроблену О.Г. Іваненком та О.М. Мельничуком (Іваненко і Мельничук, 1969) для річок і тимчасових водотоків в Українських Карпатах. Спирається вона на відому формулу А.М. Бефані (Бефани, 1958). Обмеженістю її є прийняття форми гідрографів припливу, які описуються квадратною параболою, що, як показали наступні дослідження Эль Фрігі Хасен Лотфі, Джабура Кхалдуна і М.В. Гопцій (Гопченко і Гопцій, 2015), не відповідають реальній динаміці паводків гірських річок Карпат. До речі, дослідження Эль Фрігі Хасен Лотфі відносяться тільки до території Закарпаття, а М.В. Гопцій – для Передкарпаття. Як і в роботі О.Г. Іваненка з О.М. Мельничуком, для Закарпаття розрахункова схема побудована за методикою А.М. Бефані. З огляду на те, що розробки О.Г. Іваненка, О.М. Мельничука, з одного боку, а Эль Фрігі Хасен Лотфі, – з іншого, відрізняються базовими параметрами (головні з них – форма гідрографів припливу і розрахункова тривалість надходження води зі схилів у руслову мережу) і структурно, доцільно мати єдину розрахункову методику для всього регіону Карпат. Приклад застосування такої методики показаний у роботі М.В. Гопцій, але лише для території Передкарпаття (Гопченко і Гопцій, 2015).

Що стосується території Криму, то тут заслуговує уваги методика О.Л. Скорик – Є.Д. Гопченка (Скорик, 1997). Вона, також як і методика О.Г. Іваненка та О.М. Мельничука, спирається на модель А.М. Бефані, яка має деякі обмеженості у використанні. Також слід відмітити, що в цій методиці основна увага була прикута до території степного Криму, тоді як у даному дослідженні основний об'єкт – Гірський Крим.

Таким чином, аналіз сучасних вітчизняних та закордонних доробок з питань розрахунку максимального стоку водних об'єктів, особливо в умовах виникнення екстремальних природних явищ, показує необхідність розробки єдиної більш досконалої науково-методичної бази для визначення максимального стоку невивчених у гідрологічному відношенні річок у гірських регіонах України.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Створення універсальної математичної моделі формування і розрахунку характеристик паводків (з урахуванням процесів, що відбуваються на схилах і в русловій мережі) та її реалізація для гірських річок України в сучасних кліматичних умовах є частиною загальної проблеми вивчення та моделювання процесів формування максимального стоку річок, з урахування особливостей сучасного періоду регіональних і глобальних змін клімату.

Актуальність проблеми. За даними Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), за останнє десятиріччя у світі було зареєстровано рекордно велику кількість стихійних катастроф, від яких постраждало близько 2,7 млрд чоловік, тобто більше третини населення планети. Україна вперше стає одним із світових лідерів за кількістю жертв від стихійних явищ. Так, у 2008 р., згідно з рейтингом CRED, Україна посіла дев'яте місце внаслідок паводку, коли постраждало близько 225 000 і загинуло 38 чоловік (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 1990–2014; EM-DAT, Feb. 2015). У Глобальній доповіді про оцінку небезпеки стихійних лих 2015 р. (GAR-2015) (UNISDR, 2015) основними небезпеками для України виділено землетруси та паводки, причому величина збитків від паводків становить 99,3% від

загальної величини й обчислюється більше ніж в 1 млн доларів США.

Реалізація результатів даного дослідження має переваги перш за все в частині теоретичної бази розрахунку ймовірнісних величин паводків на гірських річках. Уперше створено універсальну методику, яка є загальною як для паводків, так і водопіль та охоплює водозбори будь-яких розмірів (від окремих схилів до великих річкових систем). Запровадження розробленої науково-технічної продукції дозволить забезпечити більшу надійність проектування та експлуатації гідротехнічних споруд на річках гірського Криму та Карпат як найбільш паводкобезпечних регіонів України. Результати пропонуються використовувати при підготовці нормативних документів по визначенню розрахункових характеристик гідрологічного режиму річок.

Методика дослідження. Аналітичний огляд науково-методичної бази для нормування характеристик максимального стоку річок, у тому числі й гірських регіонів, показав доцільність застосування при побудованні розрахункових схем теоретичної моделі руслових ізохрон. Зокрема,

$$Q_m = \left(\sum_{t_p} q'_i f_j \varepsilon_j \right)_m \quad \text{при } t_p < T_0; \quad (1)$$

$$Q_m = \left(\sum_{T_0} q'_i f_j \varepsilon_j \right)_m \quad \text{при } t_p > T_0, \quad (2)$$

де Q_m – максимальна витрата води паводку (водопілля); q'_i – ординати редукційних гідрографів схилового припливу води до руслової мережі; t_p – тривалість руслового добігання; T_0 – тривалість схилового припливу; ε_j – функція русло-заплавного регулювання паводків і водопіль; f_j – міжізохронні площадки:

$$f_j = B_j V_0 \Delta t, \quad (3)$$

де B_j – ширина водозбору по ізохронах руслового добігання; V_0 – швидкість руслового добігання паводкових (повеневих) хвиль; Δt – крок у часі.

За рекомендацією (Гопченко і Гушля, 1989), функції q'_i і B_j при розв'язанні задач, пов'язаних із розрахунковими схемами в області максимального стоку, доцільно використовувати в редакції:

$$q'_i = q'_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right], \quad (4)$$

а

$$B_i = B_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right], \quad (5)$$

де q'_m – максимальний модуль схилового припливу; B_m – максимальна ширина водозборів по ізохронах руслового добігання.

За умови представлення функцій (1) і (2) у редукційному вигляді доцільно записати їх інтегральними рівняннями:

$$Q_m = \int_0^{t_p} q'_i B_i \varepsilon_i dt \quad \text{при } t_p < T_0; \quad (6)$$

$$Q_m = \int_0^{T_0} q'_t B_t \varepsilon_t dt \text{ при } t_p > T_0, \quad (7)$$

де ε_t – функція русло-заплавного зарегулювання, по якій матеріали спостережень відсутні.

Оскільки ε_t є невідомою складовою у рівняннях (6) і (7), то запишемо їх у спрощеному вигляді, а саме:

$$(Q_m)_{cnp.} = \bar{\varepsilon}_{t_p} \int_0^{t_p} q'_t B_t dt \text{ при } t_p < T_0; \quad (8)$$

$$(Q_m)_{cnp.} = \bar{\varepsilon}_{T_0} \int_0^{T_0} q'_t B_t dt \text{ при } t_p > T_0. \quad (9)$$

Перехід від (8) і (9) до рівнянь (6) і (7) можна здійснити за допомогою коефіцієнта k_ε , який дорівнює

$$k_\varepsilon = \frac{Q_m}{(Q_m)_{cnp.}}. \quad (10)$$

З урахуванням (10), $Q_m = k_\varepsilon (Q_m)_{cnp.}$, а (6) та (7) набудуть вигляду:

$$Q_m = \varepsilon_F \int_0^{t_p} q'_t B_t dt \text{ при } t_p < T_0; \quad (11)$$

$$Q_m = \varepsilon_F \int_0^{T_0} q'_t B_t dt \text{ при } t_p > T_0, \quad (12)$$

де ε_F – коефіцієнт русло-заплавного зарегулювання максимальних витрат води паводків і водопіль, який при $t_p < T_0$ має вигляд $\varepsilon_F = k_\varepsilon \bar{\varepsilon}_{t_p}$, а при $t_p > T_0$ – $\varepsilon_F = k_\varepsilon \bar{\varepsilon}_{T_0}$.

Максимальні модулі паводкового (або повеневого) стоку будуть мати такий розрахунковий вигляд:

– при $t_p < T_0$

$$q_m = \frac{Q_m}{F} = \frac{q'_m B_m}{B_{cp.} L} V_\delta \varepsilon_F \int_0^{t_p} \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right] \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right] dt =$$

$$= q'_m \left[1 - \frac{m+1}{(n+1)(m+n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n \right] \varepsilon_F \quad (13)$$

– при $t_p > T_0$

$$q_m = \frac{Q_m}{F} = \frac{q'_m B_m}{B_{cp.} L} V_\delta \varepsilon_F \int_0^{T_0} \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right] \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right] dt =$$

$$= q'_m \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p} \right)^m \right] \varepsilon_F \quad (14)$$

Вираз, що знаходиться у квадратних дужках формули (13) є убутною функцією розміру водозборів і своєю межею має одиницю (при $t_p / T_0 = 0$). Він визначає ступінь трансформації повеневих (або паводкових) хвиль під впливом розмірів водозборів. Для нього введемо позначення $\psi(t_p / T_0)$, тобто при $t_p < T_0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1 - \frac{m+1}{(n+1)(m+n+1)} \left(\frac{t_p}{T_0} \right)^n. \quad (15)$$

Аналогічною функцією розпластування паводкових (повеневих) хвиль можна визначити й для умови $t_p > T_0$, зокрема, виходячи із структури (14)

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(m+n+1)} \left(\frac{T_0}{t_p} \right)^m \right]. \quad (16)$$

Нижньою межею коефіцієнта трансформації $\psi(t_p / T_0) \in 0$ при $t_p \gg T_0$. Після описаних процедур формулу для розрахунку максимальних модулів стоку можна записати в редакції

$$q_m = q'_m \psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \varepsilon_F r, \quad (17)$$

де r – коефіцієнт зарегулювання паводкового (повеневого) стоку водоймами проточного типу.

Отже, для річок Українських Карпат як розрахункова рекомендується саме структура (17), яка фактично не має обмежень з точки зору генетичних типів паводків і водопіль, а також розмірів річок (Ovcharuk and Todorova, 2016).

З іншого боку, модуль схилового припливу q'_m у параметричному вигляді можна отримати, спираючись на (4). Для цього проінтегруємо його по T_0 , тоді

$$q'_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_m, \quad (18)$$

де $(n+1)/n$ – коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу.

З іншого боку, вираз (18) може бути використаний і в рамках редуційної структури вигляду

$$q_m / q'_m = \frac{1}{(F+1)^{n_1}}. \quad (19)$$

Формулу (19) слід вважати по суті узагальненням варіантом одномодальної геометрії гідрографів паводків і повеней, але лише для випадку, якщо мінливість тривалості припливу вод зі схилів T_0 по території в цілому невелика і її припустимо усереднити.

За цих умов q'_m дорівнює:

$$q'_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_m = k_0 Y_m, \quad (20)$$

де k_0 – коефіцієнт трансформації схилового стоку.

Зіставлення (19) і (17) свідчить, що

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) \varepsilon_F = \frac{1}{(F+1)^{n_1}}, \quad (21)$$

тобто при осередненні по території T_0 рівняння (17) зводиться до відомої структури редуційної емпіричної формули.

Формула вигляду (19) є наслідком осереднення по території тривалості схилового припливу T_0 . Як видно з (20), ця умова не є обов'язковою, але тоді T_0 не підлягає осередненню, а узагальнюється по території іншими прийомами. Зокрема, одним із варіантів узагальнення є

картування величин, і якщо спостерігається зміна по території в одному напрямку T_0 і Y_m , то редукційна формула набуває вигляду:

$$q_m = \frac{q'_m}{(F+1)^{n_1}}, \quad (22)$$

де q'_m – максимальний модуль схилового припливу, що визначається за формулою (18).

Перевагою цієї структури є, з одного боку, її простота та невелика кількість розрахункових параметрів (Ovcharuk et al., 2016). З іншого боку, на відміну від стандартних формул редукційного виду, при обґрунтуванні структури (22) застосовано метод ізохрон, що дозволяє більш повно врахувати всі стокоформуючі фактори, які в даній формулі представлені складовими модуля схилового припливу q'_m .

Редукційна структура в редакції (22) у подальших розрахунках буде реалізована на прикладі паводків теплового періоду року на річках Гірського Криму.

Реалізація (17) – для річок Українських Карпат і (22) – для річок Криму передбачає визначення усіх складових та дослідження впливу місцевих факторів на кожну із розрахункових характеристик.

Результати дослідження. Перша складова в розрахункових формулах (17) і (22) представлена у вигляді максимального модуля схилового припливу q'_m , який ураховує основні характеристики гідрографів схилового припливу: шар стоку дощових паводків Y_m , коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу $(n+1)/n$ і тривалість припливу води зі схилів до руслової мережі – T_0 . Розрахунковий максимальний модуль схилового припливу $q'_{1\%}$ визначається за рівнянням вигляду:

$$q'_{1\%} = 0,28 \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_{1\%}. \quad (23)$$

Шари стоку 1%-ї ймовірності для річок Українських Карпат, обчислені на основі кривої трипараметричного

гамма-розподілу при індивідуальних оцінках C_v і співвідношенні $C_s/C_v = 3,0$, змінюються залежно від географічного й висотного положення водозборів від 88 мм (р. Ворона – с. Тисмениця, $F = 657$ км², $H_{cp} = 330$ м) до 512 мм (р. Лужанка – м. Гошів, $F = 146$ км², $H_{cp} = 660$ м).

Діапазон коливання коефіцієнтів варіації C_v для максимальних шарів стоку Y_m : за методом моментів – від 0,48 (р. Ріка – м. Хуст, р. Жденівка – с. Верхня Грабівниця, р. Стрий – м. Турка) до 1,29 (р. Лужанка – м. Гошів); за методом найбільшої правдоподібності – від 0,48 (р. Ріка – м. Хуст, р. Жденівка – с. Верхня Грабівниця, р. Стрий – м. Турка) до 1,48 (р. Лужанка – м. Гошів). Середнє значення коефіцієнта варіації C_v за методом моментів дорівнює 0,70, а за методом найбільшої правдоподібності – 0,72 (Гопцій, 2016).

Шари стоку 1%-ї забезпеченості дощових паводків на річках Криму коливаються від 10 мм (р. Салгир – с. Листів'яне, $F=3540$ км², $H_{cp}=490$ м) до 1238 мм (притока р. Кучук – Узеньбаш, $F=2,46$ км², $H_{cp}=530$ м). Коефіцієнти асиметрії шарів стоку паводків теплового періоду C_s знаходяться в межах від 0,50 (р. Альма – с. Карагач, $F=249$ км²) до 11,9 (струм. Кизилтаський – смт Щебетівка, $F=35$ км²). У подальших розрахунках прийняті параметри статистичного розподілу, отримані методом найбільшої правдоподібності, а співвідношення C_s/C_v – осереднене на рівні 2,5 (Todorova and Ovcharuk, 2015).

У результаті дослідження здійснено просторове узагальнення шарів стоку в гірських районах Українських Карпат. Стокові характеристики в горах, на відміну від рівнинних територій, підпорядковуються не географічній зональності, а висотній поясності. Картування стокових величин, по суті, у гірських умовах неможливе або має певні труднощі. Тому виконане районування (Гопцій, 2016; Гопченко и Джабур Халдун, 1999) приведених шарів стоку 1%-ї забезпеченості до умов $H_{cp} = 500$ м і $f_n = 50\%$ (рис. 1, табл. 1).



Рис. 1. Карта-схема районів, які виділені по середніх шарах паводкового стоку, приведених до умовної висоти 500 м (гірські річки Українських Карпат) (Гопченко и Джабур Халдун, 1999)

Таблиця 1

Районовані значення параметрів рівняння шарів паводкового стоку
від середньої висоти водозборів і залісненості

Район	Шар стоку $\bar{y}_{500}$, мм	Шар стоку $\bar{y}_{500;50}$, мм	α_n	α_l
1	31,6	31,9	0,029	0,18
2	39,6	38,7	0,033	0,21
3	46,3	44,6	0,049	0,10
4	38,1	37,8	0,029	0,056

Розрахункове рівняння стосовно середніх шарів стоку має вигляд:

$$\bar{y} = \bar{y}_{500;50} k_n k_l, \quad (24)$$

де $\bar{y}_{500;50}$ – середній шар паводкового стоку, приведений до висоти $H_{cp} = 500$ м і залісненості $f_l = 50$ %;

k_n – коефіцієнт впливу висоти місцевості на шар паводкового стоку, тобто

$$k_n = 1 + \frac{\alpha_n}{\bar{y}_{500}} (H_{cp} - 500); \quad (25)$$

k_l – коефіцієнта впливу лісу на шар паводкового стоку, а саме:

$$k_l = 1 + \frac{\alpha_l}{\bar{y}_{500;50}} (f_l - 50); \quad (26)$$

Проаналізувавши залежність коефіцієнта нерівномірності руслового стоку $(m+1)/m$ від площі водозборів, встановлено й відповідний коефіцієнт нерівномірності схилового припливу в часі $(n+1)/n$ для річок Українських Карпат, який становить 9,19, а $n = 0,12$ (Гопцій,

2016) і для паводків теплового періоду на річках Криму – 16, звідки $n = 0,07$ (Овчарук і Тодорова, 2015).

На кафедрі гідрології суші ОДЕКУ розроблено прикладне програмне забезпечення для визначення однієї з найбільш проблемних характеристик схилового припливу – тривалості надходження талих і дощових вод до руслової мережі T_0 . ґрунтується воно на генетичній моделі, свого часу запропонованій проф. Бефані А.М. Вирішується задача в декілька етапів із використанням методу простої однокрокової ітерації, причому на одній з ітераційних процедур вдається визначити, крім тривалості схилового припливу T_0 , ще й коефіцієнт русло-заплавного регулювання ε_F .

На підставі даних, отриманих у результаті дослідження впливу основних чинників на тривалість припливу води зі схилів до руслової мережі, значення T_0 при $H_{cp} = 500$ м і $f_l = 50$ % були узагальнені по території Українських Карпат шляхом їхнього картування. На рис. 2 досліджувана характеристика відображена у вигляді ізоліній, які проведені (для більшої точності визначення величини T_0) із кроком 20 годин. В окремих місцях, де спостерігаються високі градієнти параметра, крок між ізолініями може становити 10 або 60 годин.

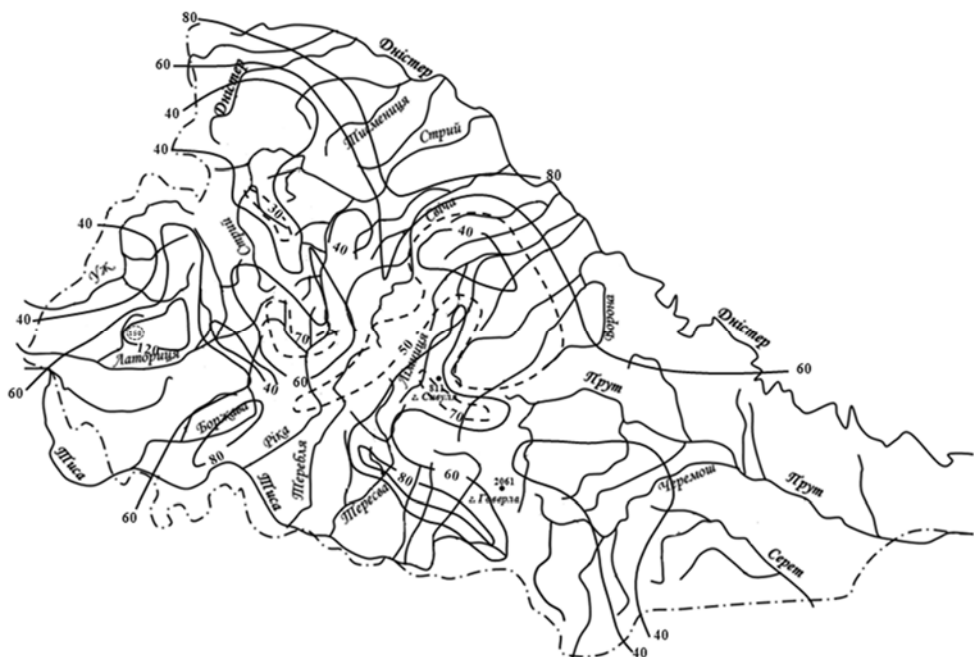


Рис. 2. Розподіл тривалості припливу води зі схилів у руслову мережу дощових паводків теплового періоду (год), приведеної до $H_{cp} = 500$ м і $f_l = 50$ %

Як видно з рис. 2, діапазон зміни T_0 по території досить великий – від 30 до 150 годин. Аналіз карти показує, що якоїсь загальної закономірності у зміні величини T_0 по території немає, проте можна виявити деякі

особливості або закономірності в межах окремих районів. Так, треба відмітити райони карстових явищ, які різняться значним збільшенням тривалості схилового припливу (Гопцій, 2016).

Розрахункове рівняння для визначення T_0 має вигляд:

$$T_0 = (T_0)_{H=500, f_a=50} \cdot k'_H \cdot k'_L, \quad (27)$$

де $(T_0)_{H=500, f_a=50}$ – тривалість припливу води дощових паводків теплового періоду (год) зі схилів у руслову мережу, приведеної до $H_{cp} = 500$ м і $f_L = 50$ %; k'_H – коефіцієнт впливу висотного положення водозборів на T_0 буде дорівнювати:

– для Закарпаття

$$k'_H = 1 + 0,43 \cdot 10^{-3} (H_{cp} - 500), \quad (28)$$

– для Передкарпаття

$$k'_H = 1 + 0,41 \cdot 10^{-3} (H_{cp} - 500); \quad (29)$$

k'_L – коефіцієнт впливу залісненості на збільшення тривалості схилового припливу дощових паводків:

– для Закарпаття

$$k'_L = 1 + 0,0108 (f_L - 50), \quad (30)$$

– для Передкарпаття вплив лісу не значущий.

На території Українських Карпат розрахунковий модуль схилового припливу $q'_{1\%}$ змінюється від $3,01 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Лютянка (Люта) – с. Чорноголова) до $14,5 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Прут – м. Яремча). Розрахункові значення для річок Гірського Криму коливаються від $0,48 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Салгир – с. Листів'яне) до $25,9 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ (р. Ворон – с. Ворон).

Надалі пропонуються дещо різні підходи для території Українських Карпат і Гірського Криму. У першому випадку складові максимального модуля схилового припливу – шар стоку та тривалість припливу води під час паводків узагальнені за територією з урахуванням впливу висоти місцевості та залісненості водозборів. Отримані розрахункові рівняння мають досить задовільну точність, що дозволяє використовувати їх у розрахунках за методикою, тобто не виникає необхідності окремо узагальнювати максимальні модулі схилового припливу. Дещо інша ситуація для території Гірського Криму – тут спостерігається дуже складне поєднання впливу, з одного боку, висоти місцевості, яка виступає як показник розподілу опадів та випаровування, а з іншого – факторів підстильної поверхні, перш за все карсту. Слід також відзначити, що карст не однаково впливає на різні складові схилового припливу (шарів стоку та тривалості припливу). Таким чином, виникає необхідність інтегрального врахування впливу висоти місцевості та факторів підстильної поверхні на сумарний схиловий стік, представлений максимальним модулем схилового припливу $q'_{1\%}$.

Незважаючи на те, що складові схилового припливу (T_0 та $Y_{1\%}$) мають значущі залежності від висоти, їхня результуюча $q'_{1\%}$ суттєво не змінюється зі зростанням висоти місцевості. Проте спостерігається зменшення $q'_{1\%}$ зі збільшенням географічної широти центрів водозборів, що відповідає розподілу опадів на даній території. Це стало підставою для картування максимальних модулів схилового припливу $q'_{1\%}$ паводків теплового періоду на річках Криму (рис. 3).



Рис. 3. Розподіл максимальних модулів схилового припливу 1%-ї забезпеченості по території Гірського Криму, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$

Аналізуючи карту, можна відмітити, що розрахункові граничні модулі схилового припливу в цілому збільшуються з північного сходу на південь від $0,5 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$ до $10\text{--}15 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$. Локальні максимуми ($20 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$) спостерігаються на річках Чорна та Ворон. У межах водозборів цих річок відбувається активне розвантаження карстових вод. З іншого боку, мінімальні значення максимальних модулів схилового припливу ($2,5 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{км}^2)$) приурочені до зони живлення карсту на водозборах річок Біюк-Карасу, Зуя, Авунда.

На останньому етапі для встановлення показника ступеня редукції n_1 у формулі (22) побудовано в логарифмічних координатах залежність $\lg q_m = f[\lg(F+1)]$. Отримана залежність добре виражена й має значущий

коефіцієнт кореляції ($r = 0,77$), а кутовий коефіцієнт рівняння лінійної регресії являє собою шуканий параметр n_1 , який дорівнює 0,53.

Розпластування максимальних модулів при переміщенні паводкових хвиль по русловій мережі під впливом часу руслового добігання для річок Українських Карпат враховується трансформаційною функцією $\psi(t_p/T_0)$, яка обумовлена часом руслового добігання t_p . Якщо $n = 0,12$ і $m = 1,0$, вона визначається за допомогою рівнянь: при $t_p/T_0 < 1,0$ – (15); при $t_p/T_0 \geq 1,0$ – (16)

Для урахування ефектів русло-заплавного регулювання і водообміну вводиться функція ε_F (табл. 2), а для урахування можливого впливу озер, водосховищ

і ставків проточного типу пропонується застосувати формулу, рекомендовану нормативним документом СНиП 2.01.14-83 (Шмидт, 1984).

Таблиця 2

Коефіцієнт русло-заплавного регулювання ε_F дощових паводків на річках Українських Карпат

$F, \text{ км}^2$	0	10	20	50	100	>100
ε_F	1,00	0,89	0,79	0,60	0,50	$\varepsilon_F = \exp[-0.350 \cdot \lg(F + 1)]$

Точність запропонованої методики на матеріалах 93 водозборів (із площами від 18,1 до 9140 км²), за результатами перевірочних розрахунків, знаходиться на рівні 19,3%, що практично відповідає точності вихідної інформації максимальному стоку дощових паводків на гірських річках Українських Карпат ($\sigma_{Q_{1\%}} = 15,8\%$) (Гопченко та ін., 2016). Для річок Гірського Криму точність розрахунку знаходиться на рівні 20,3% при точності вихідної інформації 21,6% (Ovcharuk et al., 2016; Todorova and Ovcharuk, 2015).

Висновки

Аналітичний огляд науково-методичної бази для нормування характеристик максимального стоку річок, у тому числі й гірських регіонів, свідчить про доцільність застосування при побудові розрахункових схем теоретичної моделі руслових ізохрон.

Для річок Українських Карпат як розрахункова рекомендується саме операторна структура, яка фактично не має обмежень з точки зору генетичних типів паводків і водопіль, а також розмірів басейнів річок. З іншого боку, модель руслових ізохрон може використовуватись і в рамках редуційної структури. Модифікована редуційна формула реалізована на прикладі паводків теплового періоду року на річках Гірського Криму.

Реалізація дослідження має переваги перш за все в частині теоретичної бази розрахунку ймовірнісних величин паводків на гірських річках. Уперше створено універсальну методику, яка є загальною як для паводків, так і водопіль та охоплює водозбори будь-яких розмірів (від окремих схилів до великих річкових систем).

Запровадження розробленої науково-технічної продукції дозволить забезпечити більшу надійність проектування та експлуатацію гідротехнічних споруд на річках гірського Криму й Карпат як найбільш паводконебезпечних регіонів України.

Науково-методичні обґрунтування і практичні рекомендації можна пропонувати в установленому порядку представляти для включення їх у нормативні документи з розрахунку характеристик максимального стоку гірських річок Криму й Карпат.

Список використаних джерел

1. Айзберг, М.М., Коганер, М.С. (1966). Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6: Украина и Молдавия. Вып.4: Крым. Л.: Гидрометеоиздат.
2. Алексеев, Г.А. (1966). Схема расчета максимальных дождевых расходов воды по формуле предельной интенсивности стока с помощью кривых редукции осадков и стока. Труды ГГИ, 134, 55-71.
3. Бефани, А.Н. (1958). Основы теории ливневого стока. Труды ОГМИ, 14, 5-302.
4. Бойко, В.М., Петренко, Л.В. (2006). Стихійні гідрологічні явища на річках України в останні 10–15 років та проблеми їхнього оперативного попередження. Наук. праці УкрНДГМ, 355, 272-278.
5. Гопцій, М.В., Гопченко, Є.Д. (2009). Про недоліки структурної бази нормативного документу СНиП 2.01.14-83. Вісник ОДЕКУ, 8, 209-213.
6. Гопцій, М.В. (2016). Визначення розрахункових шарів паводкового стоку для річок Українських Карпат та узагальнення їх по території. Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія, 1(40), 51-59.
7. Гопцій, М.В. (2016). Обґрунтування характеристик схилового припливу дощових паводків на річках Карпат. Тези доповідей всеукраїнської конференції молодих вчених "Метеорологія, гідрологія, моніторинг довкілля в контексті екологічних викликів сьогодення", Київ, 16-17 листопада 2016 р. Київ: Ніка-Центр, 19-21.

8. Гопцій, М.В. (2016). Статистичний аналіз часових рядів максимальних витрат води та шарів стоку річок Українських Карпат. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції "Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації". Зб. наук. праць. Переяслав-Хмельницький, 11, 17-19.
9. Гопцій, М.В. (2016). Узагальнення тривалості схилового припливу паводкового стоку теплового періоду на річках Українських Карпат. Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія, 3(42), 26-33.
10. Гопченко, Є.Д., Гушля, А.В. (1989). Гідрологія с основами меліорації. Л.: Гидрометеоздат.
11. Гопченко, Є.Д., Джабур Кхалдун (1999). Обоснование расчетной методики для определения слоя паводочного стока рек Карпат на базе схемы районирования территории по условиям формирования паводков. Метеорология, климатология и гидрология, 39, 222-232.
12. Гопченко, Є.Д., Гопцій, М.В. (2015). Максимальний стік дощових паводків у Передкарпатті. Монографія. Одеса: ТЕС.
13. Гопченко, Є.Д., Овчарук, В.А., Гопцій, М.В. (2016). Нормування максимального стоку дощових паводків на річках Українських Карпат. Вісник Чернівецького національного університету ім. Ю. Федьковича, 775-776, 34-39.
14. Иваненко, А.Г., Мельничук, О.Н. (1969). Метод расчета вероятных максимальных расходов ливневых и дождевых вод для рек и временных водотоков в Украинских Карпатах (с применением номограмм). Метеорология, климатология и гидрология, 5, 154-164.
15. Коганер, М.С. (1969). Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.6: Украина и Молдавия. Вып.1: Западная Украина и Молдавия. Л.: Гидрометеоздат.
16. Линслей, Р.К., Колер, М.А., Паулюс, Д.Л. (1962). Прикладная гидрология (пер. с англ.). Л.: Гидрометеоздат.
17. Овчарук, В.А., Тодорова, О.І. (2015). Розрахункові характеристики граничних модулів схилового припливу під час паводків теплового періоду року на річках Гірського Криму. Фізична географія та геоморфологія, 2 (78), 103-109.
18. Раффа, У. (1969). Паводочные расходы различной вероятности в бассейне р. По. Международный симпозиум по паводкам и их расчетам, 1, 353-361.
19. Скорик, А.Л. (1997). Паводочный сток в теплую часть года на территории Крымского полуострова и его расчетные характеристики: дис. ... канд. геогр.наук: 11.00.07; Одес. гидромет. ин-т. Одесса.
20. Соколов, А.А., Ратц, С.Е., Роша, М. (1978). Расчеты паводочного стока. Методы расчетов на основе мирового опыта. Л.: Гидрометеоздат.
21. Шмидт, Т.С. (1984). Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоздат.
22. Bao, W., Zhao, L., Wang, J., Wang, H., Qian, K. (2014). Linearized calibration of vertically-mixed runoff model parameters. J. Hydroelectr. Eng., 33, 85-91.
23. Beldring, S., Engeland, K., Roald, L.A., Saelthun, N.R., Voks, A. (2003). Estimation of parameters in a distributed precipitation – runoff model for Norway. Hydrology and Earth System Sciences, 7(3), 304-316.
24. Bergstorm, S. (1992). The HBV model – its structure and applications. SMHI Reports RH, No. 4, Norrkping, Sweden.
25. Bergstorm, S. (1995). The HBV model. In Singh, V.P. (Eds.): Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. Colorado, United States, 443-476.
26. Blöschl, G. et al. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. Science, 357 (Issue 6351), 588-590. doi: 10.1126/science.aan2506
27. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters: Internationally Reported Losses 1990-2014 EM-DAT. <http://www.preventionweb.net/countries/ukr/data/>
28. Chow, V.T. (1964). Handbook of applied hydrology. New York, N.Y., McGraw-Hill.
29. Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. J. Hydrol, 158, 265-284.
30. EM-DAT (2015). Feb. 2015. The OFDA/CRED; International Disaster Database. – Universit? catholique de Louvain Brussels, Belgium. <http://www.emdat.be>
31. G Kan, X He, L Ding, J Li, K Liang, Y Hong (2017). Study on Applicability of Conceptual Hydrological Models for Flood Forecasting in Humid, Semi-Humid Semi-Arid and Arid Basins in China. Water, 9(10), 719. doi: 10.3390/w 9100719
32. Gopchenko, E.D., Ovcharuk, V.A., Romanchuk, M.E. (2015). A method for calculating characteristics of maximal river runoff in the absence of observational data: Case study of Ukrainian rivers. Water Resources. Pleiades, 42 (Issue 3), 285-291. DOI: 10.1134/S0097807815030057

33. Hughes, D.A., Metzler, W. (1995). Assessment of three monthly rainfall-runoff models for estimating the water resource yield of semiarid catchments in Namibia. *Hydrological Science Journal*, 43(2), 283-297.

34. Ovcharuk, V., Gopchenko, E., Goptsiy, M. (2016). Method of determining the maximum flood runoff for ungauged rivers of the Ukrainian Carpathians. *ABSTRACT BOOK – 2nd PannEx workshop on the climate system of the Pannonian basin*, 1-3 June 2016, Hungarian Meteorological Service, Budapest, Hungary, 61. DOI: 10.21404/PANNEX.2016

35. Ovcharuk, V., Todorova, O. (2016). Determination of characteristics maximal runoff Mountain Rivers in Crimea. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 8(2), 525-541.

36. Sajikumar, N., Thandaveswara, B. (1999). A nonlinear rainfall runoff model using an artificial neural network. *Journal of Hydrology*, 216, 32-35.

37. Seibert, J., Vis, M. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3315-3325.

38. SNA (1995). *Climate, Lakes and Rivers: The National Atlas of Sweden*, Almquist and Wiksell International, Stockholm.

39. Todorova, O., Ovcharuk, V. (2015). Study cyclicity maximum runoff rivers of Crimea in conditions of modern climate change. The 26th IUGG General Assembly, Prague, Czech Republic, Congress Center, 22 June – 2 July, 2015, *Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities*. Abstract. <http://www.iugg2015prague.com>

40. Tokar, A.S., Markus, M. (2000). Precipitationrunoff modeling using artificial neural networks and conceptual models. *J. Hydro. Eng., ASCE*, 5 (2), 156-161.

41. UNISDR 2015. *Making Development Sustainable: The Future Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR).

42. Zhao, R. (1983). *Watershed Hydrological Model-Xinjiang Model and Northern Shaanxi Model*. Water Resources and Electric Power Press: Beijing, China.

43. Zhao, R., Zhuang, Y., Fang, L., Liu, X., Zhang, Q. (1980) The Xinjiang Model. In: *Hydrological Forecasting (Proceedings Oxford Symposium)*; IAHS-AISH Press: Wallingford, UK, 129, 351-356.

References

1. Aizberh, M.M., Kaganer, M.S. (1966). *Resursy poverhnostnykh vod SSSR. T.6: Ukraina i Moldaviya. Vyp.4: Krym*. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]

2. Alekseev, G.A. (1966). Skhema rascheta maksimalnikh dozhdnykh rashodov vody po formule predelnoi intensivnosti stoka s pomoshchiu krivyykh redukcii osadkov i stoka. *Trudy GGI*, 134, 55-71. [in Russian]

3. Bao, W., Zhao, L., Wang, J., Wang, H., Qian, K. (2014) Linearized calibration of vertically-mixed runoff model parameters. *J. Hydroelectr*, 33, 85-91. [in Chinese]

4. Befani, A.N. (1958). *Osnovy teorii livnovego stoka*. Trudy OGMI, 14, 302. [in Russian]

5. Beldring, S., Engeland, K., Roald, L.A., Saelthun, N.R., Voks, A. (2003). Estimation of parameters in a distributed precipitation – runoff model for Norway. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(3), 304-316.

6. Bergstorm, S. (1992) The HBV model – its structure and applications. *SMHI Reports RH*, No. 4, Norrköping, Sweden.

7. Bergstorm, S. (1995) The HBV model. In Singh, V.P. (Eds.): *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications. Colorado, United States, 443-476.

8. Blöschl, G. and et al. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(Issue 6351), 588-590. doi: 10.1126/science.aan2506

9. Boiko, V.M., Petrenko, L.V. (2006). Stykhiini hidrolohichni yavysheha na richkakh Ukrainy v ostanni 10-15 rokiv ta problemy yikhnoho operativnoho poperedzhennia. *Nauk. pratsi UkrNDHMI*, 355, 272-278. [in Ukrainian]

10. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters <http://www.preventionweb.net/countries/ukr/data/>

11. Chow, V.T. (1964). *Handbook of applied hydrology*. New York: McGraw-Hill.

12. Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *J. Hydrol.*, 158, 265-284.

13. EM-DAT (2015, February). The OFDA/CRED (International Disaster Database). Message posted to <http://www.emdat.be>

14. G Kan, X He, L Ding, J Li, K Liang, Y Hong. (2017)/ Study on Applicability of Conceptual Hydrological Models for Flood Forecasting in Humid, Semi-Humid Semi-Arid and Arid Basins in China. *Water*, 9(10), 719. doi:10.3390/w 9100719

15. Gopchenko, E.D., Ovcharuk, V.A., Romanchuk, M.E. (2015). A method for calculating characteristics of maximal river runoff in the absence of observational data: Case study of Ukrainian rivers. *Water Resources*, 42(3), 285-291. DOI: 10.1134/S0097807815030057

16. Gopchenko, E.D., Dzhabur Khalidun (1999). Obosnovanie raschetnoy metodiki dlya opredeleniya sloya pavodochnoho stoka rek Karpat na baze shemyi rayonirovaniya territorii po usloviyam formirovaniya pavodkov. *Meteorologiya, klimatologiya i gidrologiya*, 39, 222-232. [in Russian]

17. Gopchenko, E.D., Goptsiy, M.V. (2015). Maksymalniy stik doshchovykh pavodkiv u Peredkarpatti. *Odesa: TES*. [in Ukrainian]

18. Gopchenko, E.D., Gushlya, A.V. (1989). *Gidrologiya s osnovami melioratsii*. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]

19. Gopchenko, E.D., Ovcharuk, V.A., Goptsiy, M.V. (2016). Normuvannya maksimalnoho stoku doshchovykh pavodkiv na richkakh Ukrainy Karpat. *Visnyk Chernivetskoho natsionalnoho universytetu im. Iu. Fedkovycha*, 775-776, 34-39. [in Ukrainian]

20. Goptsiy, M.V. (2016). Obgruntuvannya kharakterystyk skhylovoho pryplyvu doshchovykh pavodkiv na richkakh Karpat. Tezy dopovidei vseukrainskoi konferentsii molodykh vchenykh "Meteorologhiia, hidrolohiia, monitorynh dovkillia v konteksti ekolohichnykh vykykiv sohodennia", 19-21. [in Ukrainian]

21. Goptsiy, M.V. (2016). Statystychnyi analiz chasovykh riadiv maksimalnykh vytrat vody ta shariv stoku richok Ukrainy Karpat. *Materialy Khl Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii "Tendentsii ta perspektivy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii"*, 11, 17-19. [in Ukrainian]

22. Goptsiy, M.V. (2016). Uzhahennia tryvalosti skhylovoho pryplyvu pavodkovoho stoku teploho periodu na richkakh Ukrainy Karpat. *Hidrolohiia, hidrokhimiia, hidroekolohiia*, 3(42), 26-33. [in Ukrainian]

23. Goptsiy, M.V. (2016). Vyznachennia rozrakhunkovykh shariv pavodkovoho stoku dlia richok Ukrainy Karpat ta uzahahennia yikh po terytorii. *Hidrolohiia, hidrokhimiia, hidroekolohiia*, 1(40), 51-59. [in Ukrainian].

24. Goptsiy, M.V., Gopchenko, E.D. (2009). Pro nedoliki strukturnoi bazy normativnoho dokumentu SNyP 2.01.14-83. *Visnyk ODEKU*, 8, 209-213. [in Ukrainian]

25. Hughes, D.A., Metzler, W. (1995). Assessment of three monthly rainfall-runoff models for estimating the water resource yield of semiarid catchments in Namibia. *Hydrological Science Journal*, 43(2), 283-297.

26. Ivanenko, A.G., Melnichuk, O.N. (1969). Metod rascheta veroyatnykh maksimalnykh rashodov livnevnykh i dozhdnykh vod dlya rek i vremennykh vodotokov v Ukrainy Karpat (s primeneniem nomogramm). *Meteorologiya, klimatologiya i gidrologiya*, 5, 154-164. [in Russian]

27. Kaganer, M.S. (1969). *Resursy poverhnostnykh vod SSSR. T.6: Ukraina i Moldaviya. Vyp.1: Zapadnaya Ukraina i Moldaviya*. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]

28. Linsley, R.K., Koler, M.A., Paulius, D.L. (1962). *Prikladnaia gidrologiia*. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]

29. Ovcharuk V., Gopchenko E., Goptsiy M. (2016). Method of determining the maximum flood runoff for ungauged rivers of the Ukrainian Carpathians. *ABSTRACT BOOK – 2nd PannEx workshop on the climate system of the Pannonian basin*, 1-3 June 2016, Hungarian Meteorological Service, Budapest, Hungary, 61. DOI: 10.21404/PANNEX.2016

30. Ovcharuk, V., Todorova, O. (2016). Determination of characteristics maximal runoff Mountain Rivers in Crimea. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 8(2), 525-541.

31. Ovcharuk, V.A., Todorova, O.I. (2015). Rozrakhunkovi kharakterystyky hranychnykh moduliv skhylovoho pryplyvu pid chas pavodkiv teploho periodu roku na richkakh Hirskeho Krymu. *Fizychna heohrafiia ta heomorfologhiia*, 2 (78), 103-109. [in Ukrainian]

32. Raffa, U. (1969). Pavodochnye rashody razlichnoi veroiatnosti v basseine r. Po. *Mezhdunarodnyi simpozium po pavodkam i ikh raschetam*, 1, 353-361. [in Russian].

33. Sajikumar, N., Thandaveswara, B. (1999). A nonlinear rainfall runoff model using an artificial neural network. *Journal of Hydrology*, 216, 32-35.

34. Seibert, J., Vis, M. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3315-3325.

35. Shmydt, T.S. (1984). *Posobie po opredeleniyu raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik*. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]

36. Skorik, A.L. (1997). Pavodochnyi stok v tepleyuu chast goda na territorii Krymskogo poluostrova i ego raschetnyie kharakteristiki. *Disertatsiya kandidata geograficheskikh nauk*. Biblioteka Odesskogo gosudarstvennogo ekologicheskogo universiteta, Odessa. [in Russian]

37. SNA (1995). *Climate, Lakes and Rivers*. The National Atlas of Sweden, Almquist and Wiksell International, Stockholm.

38. Sokolov, A.A., Rantts, S.E., Rosha, M. (1978). *Raschety pavodochnoho stoka. Metody raschetov na osnove mirovogo opyta*. Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]

39. Todorova, O., Ovcharuk, V. (2015). Study cyclicity maximum runoff rivers of Crimea in conditions of modern climate change. The 26th IUGG General Assembly, Prague, Czech Republic, Congress Center, 22 June – 2 July, 2015, *Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities*. Abstract, 119. <http://www.iugg2015prague.com>

40. Tokar A.S., Markus M. (2000). Precipitationrunoff modeling using artificial neural networks and conceptual models. *J. Hydro. ASCE*, 5 (2), 156-161.

41. UNISDR (2015). *Making Development Sustainable. The Future Disaster Risk Management. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland: United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR).

42. Zhao, R. (1983). *Watershed Hydrological Model-Xinjiang Model and Northern Shaanxi Model*. Water Resources and Electric Power Press: Beijing, China.

43. Zhao, R., Zhuang, Y., Fang, L., Liu, X., Zhang, Q. (1980) The Xinjiang Model. In: *Hydrological Forecasting (Proceedings Oxford Symposium)*; IAHS-AISH Press: Wallingford, UK, 129, 351-356.

Надійшла до редколегії 09.11.17

E. Gopchenko, Dr. Sci. (Geogr.), Professor,
E-mail: gidro@odeku.edu.ua
V. Ovcharuk, Dr. Sci. (Geogr.), Associate Professor,
E-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com
J. Shakirzanova, Dr. Sci. (Geogr.), Professor,
E-mail: jannettodessa@gmail.com
M. Goptsiy, Cand. Sci. (Geogr.),
E-mail: Goptsiy-odeky@ukr.net
A. Traskova, Cand. Sci. (Geogr.),
E-mail: knopka210689@gmail.com
N. Shvec, Researcher Associate, E-mail: Natzin@ukr.net
Z. Serbova, Researcher Associate, E-mail: Natzin@ukr.net
O. Todorova, Cand. Sci. (Geogr.),
E-mail: lenochka.todorova1989@gmail.com
Odessa State Environmental University
Hydrometeorological Institute
15 Lvivska Str., Odessa, 65016, Ukraine

MODELLING OF EXTREME FLOODS ON EXAMPLE OF MOUNTAIN REGIONS OF UKRAINE

In the conditions of modern changes of climate both in Ukraine and in the world on the whole, probability of the extreme hydrological phenomena rises substantially, in particular, catastrophic floods of different origin. The analysis of flood distribution on the territory of Ukraine shows that an overwhelming amount of destructive floods happened in Ukrainian Carpathians, where they are the characteristic feature of the hydrological mode of the rivers. Floods which are observed on the rivers of Crimean Mountains also, for individual years, had catastrophic character. For determination of water discharge calculations in the period of floods on the mountain rivers of Ukraine authors offer a scientific-methodical base which is based on modern scientific achievements in area of theoretical and applied hydrology. Fundamentally new in the proposed model is the separation of factors of forming and transformation of flood flow on slopes and in a river-bed network. The method of numeral solution of task was developed for nonmeasurable descriptions of floods and it found practical application. As a result, the numerical values of the main components of the slope inflow are obtained: the layers of runoff for the flood of 1% probability and the duration of the slope inflow, which are generalized over the territory, taking into account the influence of intrazonal and azonal factors (forestation, mean height of the catchments and karst) and coefficient of time nonuniformity of slope inflow, which are averaged within the studied regions. The process of transformation of slope inflow into channel runoff is described with the help of transformation functions that take into account the time of channel run-up and flood plain regulation. The accuracy of determining the maximum modules of the runoff of 1% probability of exceeding depends on the accuracy of the initial information, which makes it possible to recommend the proposed methodology for practical use in order to increase the level of hydraulic engineering projects and water resources management on the mountain territories of Crimea and Carpathians.

Keywords: scientific-methodical base, maximal runoff, rain floods, mountain rivers.

Е. Гопченко, д-р геогр. наук, проф.,
E-mail: gidro@odeku.edu.ua
В. Овчарук, д-р геогр. наук, доц.,
E-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com
Ж. Шакирзанова, д-р геогр. наук, проф.,
E-mail: jannettodessa@gmail.com
М. Голций, канд. геогр. наук,
E-mail: Goptsiy-odeky@ukr.net
А. Траскова, канд. геогр. наук,
E-mail: knopka210689@gmail.com
Н. Шве́ц, науч. сотр., E-mail: Natzin@ukr.net
З. Сербо́ва, науч. сотр., E-mail: Natzin@ukr.net
О. Тодорова, канд. геогр. наук,
E-mail: lenochka.todorova1989@gmail.com
Гидрометеорологический институт
Одесский государственный экологический университет,
ул. Львовская, 15, г. Одесса, 65016, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНО ВЫСОКИХ ПАВОДКОВ НА ПРИМЕРЕ ГОРНЫХ РЕГИОНОВ УКРАИНЫ

В условиях современных изменений климата, как в Украине, так и в мире в целом, существенно повышается вероятность наступления экстремальных гидрологических явлений, в частности катастрофических паводков разного происхождения. Анализ распределения по территории Украины выдающихся паводков и половодий показал, что подавляющее количество разрушительных паводков приходится на наиболее паводкоопасный район – Украинские Карпаты, где паводки являются характерной чертой гидрологического режима рек. Паводки, которые наблюдаются на реках Горного Крыма также, в отдельные годы носят катастрофический характер. Для определения расчетных расходов воды в период паводков на горных реках Украины авторами предлагается научно-методическая база, которая основывается на современных научных достижениях в области теоретической и прикладной гидрологии. Принципиально новым в предложенной модели есть отделение факторов формирования и трансформации паводкового стока на склонах и в русловой сети. Обоснованные подходы к пространственному обобщению расчетных параметров; относительно неизменяемых характеристик паводков, разработана и доведена до практического применения методика численного решения задачи. В результате получены численные значения основных составляющих склонового притока – слою стока за паводок 1%-ной обеспеченности и продолжительность склонового притока, которые обобщены по территории с учетом влияния интразональных и аazonальных факторов (залесенности, средней высоты водосборов и карста), а также коэффициенты его временной неравномерности, которые осреднены в пределах исследуемых регионов. Процесс трансформации склонового притока в русловой сток описан с помощью трансформационных функций, учитывающих время руслового добега и русло-пойменное регулирование. Точность определения максимальных модулей стока 1%-ной вероятности превышения находится на уровне точности исходной информации, что позволяет рекомендовать предложенную методику для практического использования с целью повышения уровня обоснований проектов и мероприятий в условиях ведения хозяйства на горных территориях Крыма и Карпат.

Ключевые слова: научно-методическая база, максимальный сток, дождевые паводки, горные реки.