

УДК 556.16

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКУ ВОДИ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ ЗА МЕТОДОМ «INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION»

Л. О. Горбачова, В. С. Приходькіна, Б. Ф. Христюк,
Т. О. Заболотня, В. О. Розлач

Український гідрометеорологічний інститут,
проспект Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна,
gorbachova@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1033-9385>

Знання щодо тенденцій максимального стоку річок мають важливе практичне значення, особливо для проектування та експлуатації гідротехнічних споруд. У даній статті надані результати дослідження максимального стоку річки Південний Буг. Вода річки широко використовується для гідроенергетики, промислового та комунального водопостачання, сільського господарства, зрошення, судноплавства, туризму тощо.

У роботі для дослідження максимального стоку води використано метод «Indicators of Hydrologic Alteration» (ІНА), який широко використовується у світі. За цим методом розраховують кількісні статистичні характеристики водного стоку річок, озер, водосховищ і визначають ступінь змін їхнього гідрологічного режиму. ІНА застосовують для водних об'єктів, які мають природний або зарегульований стік. Однак, в Україні метод ІНА поки що не набув широкого вжитку.

Метою роботи є використання методу «Indicators of Hydrologic Alteration» для дослідження характеристик максимального стоку води та їхніх змін вздовж річки Південний Буг.

Дослідження виконано за даними спостережень 5 гідрологічних постів, які розташовані вздовж річки Південний Буг. Використано щоденні середньодобові витрати води від початку спостережень по 2018 та 2019 рр. включно. Водний стік річки на кожному гідрологічному посту було розподілено на п'ять складових: «Extreme low flows» (надзвичайно низький стік), «Low flows» (низький стік), «High-flow pulses» (пульсації високого стоку), «Small floods» (невеликі повені), «Large floods» (великі повені). Це надало змогу виокремити із загального стоку води три складові високого (максимального) стоку, для яких і було розраховано статистичні показники ІНА.

Виявлено, що довготривалі зміни високого стоку відрізняються в кожному із трьох його компонентів, хоча і мають загальні тенденції. Найбільш значимі зміни виявлено для великих повеней, тоді як для пульсацій високого стоку, навпаки, не було виявлено суттєвих змін. Загальні тенденції високого стоку показують, що з часом величини максимальних витрат води мають тенденцію до зменшення, а тривалість періодів з високим стоком зростає.

Значення основних статистичних показників високого стоку поступово зростають від витoku до гирла річки, що повністю відповідає фізико-географічним умовам його формування. Разом з цим, виявлено деякі особливості високого стоку. Так, найбільшу тривалість невеликі повені та пульсації високого стоку мають у верхів'ї річки.

У середньому на р. Південний Буг великі повені повторюються 1 раз на 10 років, невеликі – 1 раз на 2 роки, пульсації високого стоку – 4-8 разів на рік у верхів'ї та 9-14 разів на рік у середній течії.

Ключові слова: максимальний стік; річка Південний Буг; статистичний аналіз; щоденні витрати води; ІНА

1. ВСТУП

Найбільші витрати води, які спостерігаються на річках у період водопіль та паводків спричиняють значні і тривалі затоплення територій, іноді з катастрофічними наслідками. У світі такі

явища наносять значні матеріальні збитки, які складають мільярди доларів [1-5]. Отже, відомості щодо тенденцій і характеристик максимального стоку річок є дуже важливими для інформування відповідних органів управління з метою запобігання негативних наслідків. Окрім того,

від правильної оцінки максимальних витрат води при проектуванні та будівництві гідротехнічних споруд залежить безперерйність їхньої роботи за період служби, а також безпека прилеглих до річок об'єктів інфраструктури, у тому числі, населених пунктів, промислових підприємств, до-ріг, сільськогосподарських угідь, тощо [6, 7]. Необхідно також враховувати, що за прогнозами вчених небезпечні водопілля та паводки стануть більш звичайним явищем у майбутньому, у теплішому кліматі [8-12].

Оцінювання максимальних витрат води традиційно виконують статистичними методами. Найбільш часто використовують ймовірнісні підходи для визначення розрахункових характеристик стоку річок. Визначення максимального стоку річок різної ймовірності перевищення дозволяє задовольнити більшість потреб споживачів, наприклад, визначати повторюваність настання небезпечних весняних водопілля, зони можливого затоплення територій при їхньому проходженні, тощо. Разом з цим, такий підхід дозволяє оперувати тільки певним набором інформації (витрата води різної ймовірності перевищення, середнє значення, коефіцієнти варіації та асиметрії). Цієї інформації недостатньо для вирішення багатьох задач. У світі останнім часом все більше науковців розроблюють нові методологічні підходи, які характеризуються використанням і поєднанням різних методів, даних, тощо [3, 9, 11, 13, 14]. Такі рішення зазвичай поєднують, наприклад, статистичний і детерміністичний підходи, використовують додаткові дані, параметри, тощо.

У світі набув широкого вжитку метод Indicators of Hydrologic Alteration (ІНА), який було розроблено наприкінці ХХ століття в США [15-17]. Цей підхід дозволяє розраховувати кількісні статистичні характеристики для оцінювання водного стоку річок, озер та водосховищ і ступеня змін їхнього гідрологічного режиму. Однак, в Україні метод ІНА поки що не використовується, хоча він дозволяє дуже швидко обробляти значні масиви гідрологічної інформації, оскільки для розрахунків використовується програмне забезпечення, яке є у вільному доступі для дослідників. Підходи застосування ІНА постійно удосконалюються. Сьогодні програмне забезпечення дозволяє розраховувати 67 статистичних показників [18].

Метою роботи є використання методу Indicators of Hydrologic Alteration для дослідження характеристик максимального стоку води та їхніх змін вздовж річки Південний Буг.

2. ОПИСАННЯ ОБ'ЄКТА, ВИХІДНИХ ДАНИХ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Об'єкт дослідження

Басейн річки Південний Буг охоплює частину Волино-Подільської та Дніпровської височини, а також Причорноморської низовини. Річка протікає виключно в межах України. Водозбір річки займає 10,6 % території України і складає 63700 км², її довжина – 806 км, середній похил – 40 см/км. Річка тече з північного заходу на південний схід і впадає в Бузький лиман, який на висоті 0,2 м над рівнем моря з'єднується з Чорним морем [19] (рис. 1).

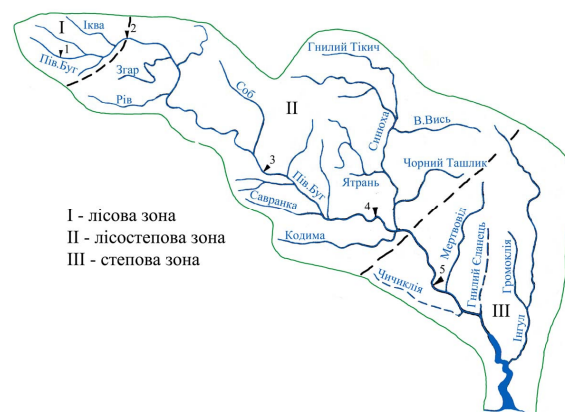


Рис. 1. – Схема басейну річки Південний Буг та розташування основних гідрологічних постів на її руслі (нумерація постів відповідає таблиці 1)

Fig. 1 – Scheme of the Southern Buh River Basin and location of the main gauge stations on its channel (numbering of posts corresponds to table 1)

Для басейну річки Південний Буг характерне чітко виражене весняне водопілля, під час якого формується від 35 до 60% річного стоку [20]. Басейн Південного Бугу можна умовно розділити на три частини, які відрізняються між собою за умовами формування водного стоку (рис. 1) [19, 21]:

I) Верхня частина басейну, знаходиться у лісовій зоні. Її може характеризувати гідрологічний пост р. Південний Буг – с. Селище: площа водозбору – 9100 км², довжина від гирла – 550 км, середня багаторічна витрата води – 28,4 м³/с, найбільша витрата води весняного водопілля – 250 м³/с (21.03.2003). Найбільші витрати води спостерігаються у період весняного водопілля, а найменші – у зимовий період з грудня по лютий.

II) Середня частина басейну, розташована у лісостеповій зоні. Замикальним постом цієї зони, можна вважати гідрологічний пост р. Південний Буг – смт Олександрівка: площа водозбору –

Таблиця 1 – Список обраних гідрологічних постів на річці Південний Буг
Table 1 – List of selected gauge stations on the Southern Buh River

№	Назва посту на р. Південний Буг	Відстань від гирла, км	Площа водозбору, км ²	Широта/Довгота	Висота над рівнем моря, м БС	Щоденні середньодобові витрати води	
						Період	$Q_{сеп.}$, м ³ /с
1	с. Пирогівці	712	827	49,22/27,15	274	1964-2019	3,91
2	с. Лелітка	641	4000	49,33/27,54	250	1936-40, 1943, 1964-2019	13,9
3	с. Тростяничик	369	17400	48,30/29,23	156	1931-35, 1950-60, 1964-67, 1969-2018	45,8
4	с. Підгір'я	220	24600	48,05/30,40	78	1926-40, 1943, 1958-2018	57,1
5	сміт Олександрівка	132	46200	47,41/31,16	10	1914-22, 1924-31, 1933-40, 1943-2019	83,7

46200 км², довжина від гирла – 132 км, середня багаторічна витрата води – 83,7 м³/с, найбільша витрата води весняного водопілля – 5320 м³/с (08.04.1932). Найбільш багатководними місяцями цієї частини басейну є лютий, березень та квітень. Найменші витрати спостерігаються у літньо-осінній період.

III) Нижня частина басейну р. Південний Буг, розташована у степовій зоні на Причорноморській низовині. Для цієї зони немає замикального посту спостережень щодо витрат води. Переважна більшість річок цієї зони пересихає у літній період, а взимку перемерзає. Літні дощі (за винятком сильних) не утворюють поверхневого стоку.

У цілому для басейну Південного Бугу характерним є помірно-континентальний клімат. Коливання середньої багаторічної температури повітря у верхній та середній частинах басейну – 7,1-8,1°C, а нижньої частини – 8,0-10°C. Різниця між середніми багаторічними температурами повітря верхньої і нижньої частини басейну може становити 3,1°C.

Кількість опадів поступово зменшується від верхів'я до гирла річки. У верхній частині водозбору річки річна норма опадів становить 670 мм, у середній – 550, а нижній – 440-470 мм. У теплий період року випадає 60-70 % від загальної суми опадів [22].

Природний стік Південного Бугу зазнає впливу господарської діяльності. Так, в басейні створено понад 8000 штучних водойм. Вода річки широко використовується для гідроенергетики, промислового та комунального водопостачання, сільського господарства, зрошення, судноплавства, туризму тощо [23].

2.2 Вихідні дані

У дослідженні використано ряди спостережень 5 гідрологічних постів, які розташовано безпосередньо на руслі річки Південний Буг

(табл. 1, рис. 1). Використано щоденні середньодобові витрати води від початку спостережень по 2018 та 2019 рр. включно. На жаль, гідрологічний пост біля села Селище не можна використати для дослідження, оскільки спостереження на цьому посту розпочалися тільки у 2002 році і, відповідно, їхня тривалість є недостатньою. Обрані пости спостережень досить рівномірно розташовані вздовж річки, що дозволить простежити розраховані статистичні показники за ІНА та дослідити їхні зміни.

2.3 Методи дослідження

Для дослідження максимального стоку води р. Південний Буг використано метод Indicators of Hydrologic Alteration [18]. ІНА працює зі щоденними рівнями, витратами річок, озер і підземних вод та дозволяє визначати статистичні показники природного та порушеного гідрологічного режиму водних об'єктів. За цим методом водний стік річки умовно розкладається на п'ять складових:

- «**Extreme low flows**» (надзвичайно низький стік) – маловоддя, яке спостерігається на річках у періоди посух.

- «**Low flows**» (низький стік) – спостерігається на річках у періоди після весняних водопіль, зимових та дощових паводків, коли живлення річки відбувається тільки за рахунок надходження ґрунтових вод.

- «**High-flow pulses**» (пульсації високого стоку) – спостерігаються на річках під час злив влітку або відлиг узимку, а також з інших причин (попуски водосховищ, тощо). При такому різновиді стоку річка не виходить з берегів.

- «**Small floods**» (невеликі повені) – теж саме, що і «**High-flow pulses**», але з виходом річки на заплаву без катастрофічних наслідків.

- «**Large floods**» (великі повені) – надзвичайно високі повені, які трапляються рідко та спричиняють катастрофічні наслідки.

Для розділення масивів щоденних витрат во-

ди на складові використовувалися значення параметрів, які рекомендовано розробником ІНА [18]. Усі щоденні витрати води, які перевищують 75-й перцентиль середніх добових витрат води за увесь період спостережень, відносяться до високого стоку, а ті, що нижче 50-го перцентилля – до низького стоку. Між цими двома значеннями високий стік розпочинається тоді, коли щоденні витрати води зростають більше ніж на 25% за день і закінчується, коли відбувається зниження щоденних витрат води менше ніж на 10% за добу. Невеликі повені визначаються як високий стік з максимальною витратою, яка спостерігається не частіше одного разу на два роки, а великі повені – як високий стік з максимальною витратою, яка спостерігається не частіше одного разу на десять років. Усі високі витрати води, які не відносяться до великих та невеликих повеней, вважаються пульсаціями високого стоку. До надзвичайно низького стоку відносять витрати води, які менші 10-го перцентилля, а до низького стоку – витрати води, що перебувають в межах 10-50-го перцентилів.

Для розрахунків параметрів максимального стоку Південного Бугу використано програмне забезпечення «Indicators of Hydrologic Alteration» (ІНА), версії 7.1.0.10, яке розроблено The Nature Conservancy (TNC) впродовж 1996-2009 рр. У дослідженні розраховувались наступні статистичні показники:

- порогові значення витрат води, м³/с;
- середні значення витрат води при проходженні піка, м³/с;
- середня тривалість повеней, доба;
- середня частота повеней, кількість випадків/рік;
- середня дата (юліанська) настання піку;
- середні значення інтенсивності росту витрат води на підйомі, (м³/с)/доба;
- середні значення інтенсивності зниження витрат води на спаді, (м³/с)/доба.

«Юліанські дати» - це технічний прийом, який враховує різницю в одну добу між тривалістю високосного і невисокосного року. У «юліанському календарі» ІНА тривалість кожного року становить 366 днів. У високосний рік «юліанська дата» 60 відповідає даті - 29 лютого. У невисокосний рік «юліанська дата» 60 залишається порожньою. Завдяки цьому прийому кожна дата звичайного календаря відповідає одній і тій же даті «юліанського календаря».

У роботі також було проаналізовано зміни характеристик високого стоку вздовж річки та з часом.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Максимальні середньомісячні витрати води на р. Південний Буг спостерігаються у квітні (рис. 2 а). Зазвичай найбільші середньомісячні багаторічні витрати води у верхній та середній течії р. Південний Буг спостерігається також у квітні. Вийняток є пост спостережень біля смт Олександрівка, для якого така витрата спостерігається у березні (рис. 2 б).

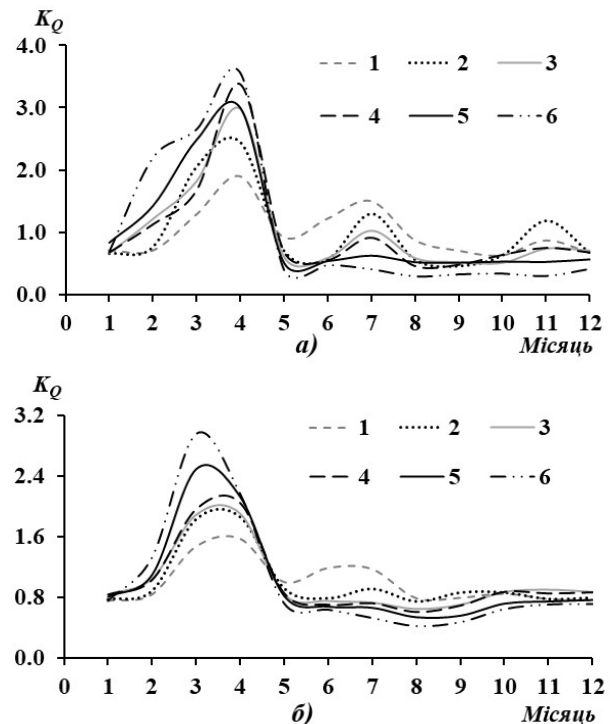


Рис. 2. – Максимальні середньомісячні витрати води (а) та середньомісячні багаторічні витрати води (б) на річці Південний Буг (1 – р. Південний Буг - с. Пирогівці; 2 – р. Південний Буг - с. Лелітка; 3 – р. Південний Буг - с. Тростянчик; 4 – р. Південний Буг - с. Підгірці; 5 – р. Південний Буг - смт Олександрівка; 6 – р. Синюха - с. Синюхін Брід)

Fig. 2 – Maximum average monthly discharges (a) and mean monthly long-term discharges (b) on the Southern Buh River (1 – Southern Buh River - Pyrohivtsi village; 2 – Southern Buh River - Lelitka village; 3 – Southern Buh River - Trostyanchyk village; 4 – Southern Buh River - Pidhir'ya village; 5 – Southern Buh River - Olexandrivka village; 6 – Synyuha - Synyuhyn Brid village)

Така ситуація пояснюється особливостями формування водного стоку, а саме значним впливом р. Синюха на формування витрат води річки Південний Буг біля смт Олександрівка. Річка Синюха є лівою притокою Південного Бугу, яка впадає у нього за 0,5 км вище від м. Первомайськ. Синюха є найбільшою за площею і водністю притокою Південного Бугу [22].

У місці впадіння її середня водність стано-

вить близько 40 % від загальної водності Південного Бугу. Після впадіння р. Синюхи до Південного Бугу витрати води у його кінцевому гідрологічному створі біля смт Олександрівка майже не змінюються за відсутності суттєвої приточності. Басейн р. Синюха розташовано у лісо-степовій зоні (рис. 1). Період сніготанення на водозборі Синюхи настає раніше і відбувається більш інтенсивніше у порівнянні з частиною басейну Південного Бугу, яка розташована від витоків до поста спостережень біля с. Підгір'я, за рахунок більш високих температур повітря та зменшення лісового покриву. Все це й визначає настання найбільшої водності на річці Синюха саме у березні та її досить вагомий вплив на формування водності р. Південний Буг, про що і

свідчать дані багаторічних спостережень (рис. 2 б).

Порогові значення витрат води, за якими відбувався розподіл характеристик водного стоку на п'ять складових, наведено у табл. 2. Приклад такого розподілу для гідрологічного поста р. Південний Буг – смт Олександрівка наведено на рис. 3.

Після цього у роботі виконано аналіз розрахованих статистичних параметрів за ІНА для таких складових стоку як великі повені, невеликі повені та пульсації високого стоку.

Середні багаторічні, порогові та середні пікові значення витрат води на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг зростають у напрямку від витоків до гирла річки (табл. 1, 2, 3, рис. 4).

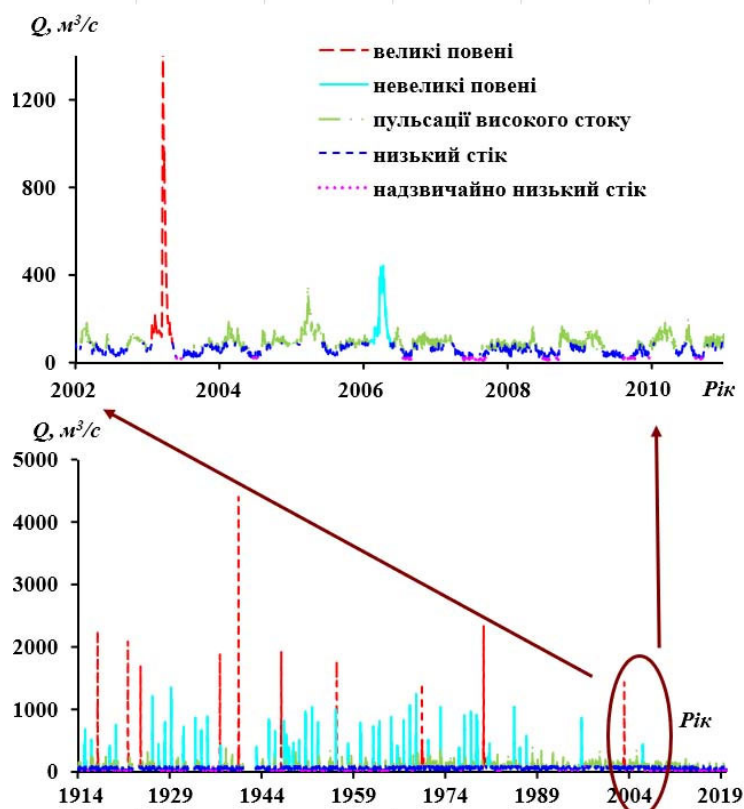


Рис. 3. – Розділення гідрографів за різними характеристиками водного стоку для гідрологічного поста р. Південний Буг - с. Олександрівка (детально за 2002–2010 рр.)

Fig. 3. – Separation of hydrographs into different flow types for gauge station of the Southern Buh River - Olexandrivka village (detail from the years 2002–2010)

Таблиця 2 – Порогові значення витрат води на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг, m^3s^{-1}

Table 2 – Discharge thresholds at gauge stations along the Southern Buh River, m^3s^{-1}

Гідрологічний пост	Великі повені	Невеликі повені	Пульсації високого стоку	Низький стік	Надзвичайно низький стік
Пирогівці	$\leq 30,8$	$\leq 14,8$	$\leq 5,10$	$\geq 3,05$	$\geq 1,01$
Лелітка	≤ 155	$\leq 44,5$	$\leq 16,0$	$\geq 10,6$	$\geq 4,32$
Тростянчик	≤ 685	≤ 194	$\leq 53,6$	$\geq 35,2$	$\geq 13,3$
Підгір'я	≤ 825	≤ 235	$\leq 65,6$	$\geq 44,0$	$\geq 17,4$
Олександрівка	≤ 1400	≤ 394	$\leq 92,0$	$\geq 58,3$	$\geq 22,8$

Таблиця 3 – Середні пікові значення витрат води на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг, m^3s^{-1}
Table 3 – Mean values of the peak discharge at gauge stations along the Southern Buh River, m^3s^{-1}

Гідрологічний пост	Великі повені	Невеликі повені	Пульсації високого стоку
Пирогівці	42,9	21,1	6,22
Лелітка	212	95,3	19,4
Тростяничик	1019	367	59,4
Підгір'я	1321	453	75,2
Олександрівка	2121	733	110

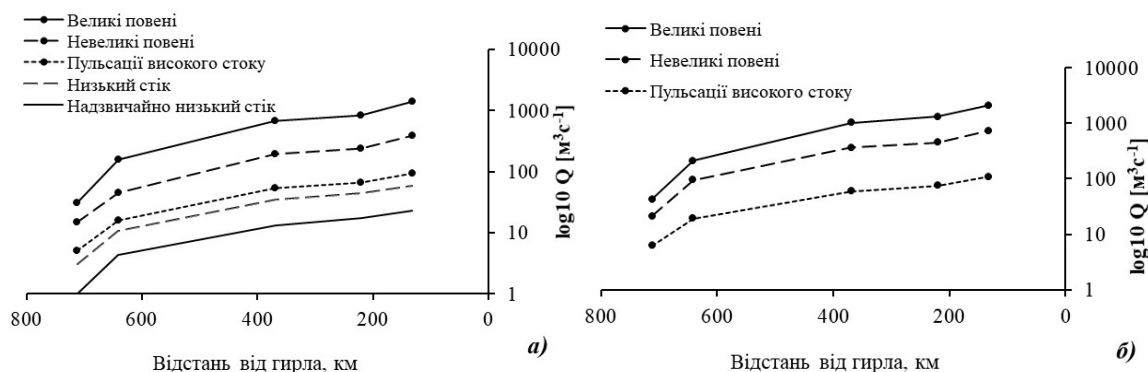


Рис. 4. – Порогові (а) та середні пікові (б) значення витрат води на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг
Fig. 4. – Discharge thresholds (a) and mean values of the peak discharge (b) at gauge stations along the Southern Buh River

Середня тривалість великих повеней зростає у напрямку від витoku р. Південний Буг до гирла від 32 до 75 діб. Найбільшу тривалість невеликі повені мають у верхів'ї, а на решті річки тривалість перебуває в межах 55-61 діб. Тривалість пульсацій високого також найбільша у верхів'ї та зменшується у напрямку до гирла річки (табл. 4, рис. 5 а).

Великі повені на р. Південний Буг трапляються в середньому один раз на десять років, а невеликі – один раз на два роки. Пульсації високого стоку відбуваються 4-8 раз на рік у верхів'ях річки і 9-14 раз на рік в середній течії (табл. 4, рис. 5 б).

Середні юліанські дати піків великих та невеликих повеней у верхів'ях р. Південний Буг спостерігаються в перших декадах квітня та травня, відповідно, а в середній течії – у третій декаді березня. Пульсації високого стоку вздовж р. Південний Буг спостерігаються в першій-другій декаді липня (табл. 4, рис. 5 в).

Для усіх трьох видів високого стоку інтенсивність росту витрат води на підйомі зростає з наближенням до гирла р. Південний Буг, однак найбільшими темпами зростання характеризуються високі повені, а найменшими – пульсації високого стоку (табл. 5, рис. 6 а). Теж саме стосується і інтенсивності зниження витрат води на спаді високого стоку (табл. 5, рис. 6 б).

Таблиця 4 – Середня тривалість (доба) / середня частота (кількість випадків/рік) / середні юліанські дати піків (доба) складових водного стоку на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг

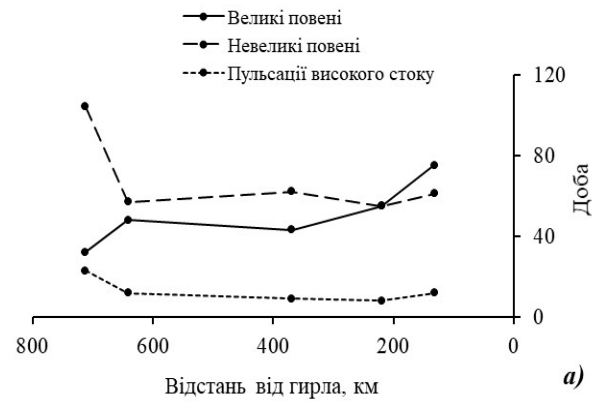
Table 4 – Mean duration (days) / mean frequency (number of cases/year) / mean Julian dates peaks (days) of different flow types at gauge stations along the Southern Buh River

Гідрологічний пост	Великі повені	Невеликі повені	Пульсації високого стоку
Пирогівці	32/0,11/101	104/0,46/128	23/4,13/184
Лелітка	48/0,11/99	57/0,50/108	12/7,71/193
Тростяничик	43/0,10/88	62/0,46/89	9/13,7/195
Підгір'я	55/0,09/89	55/0,45/88	8/12,3/201
Олександрівка	75/0,10/85	61/0,50/83	12/8,85/185

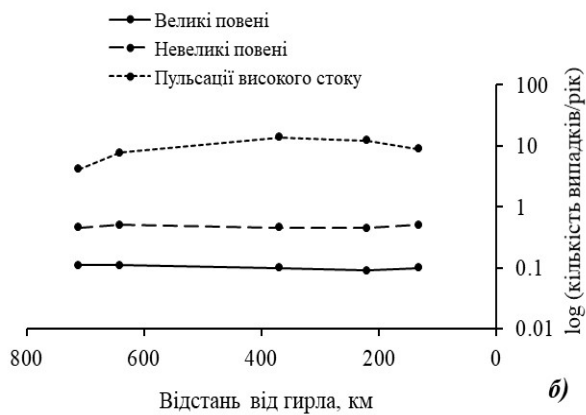
Таблиця 5 – Інтенсивність росту витрат води на підйомі (чисельник) та інтенсивність зниження витрат води на спаді (знаменник) високого стоку на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг, $(\text{m}^3/\text{с})/\text{доба}$

Table 5 – Intensity of discharges increase on rise (numerator) and intensity of discharges decrease on recession (denominator) of high flow at gauge stations along the Southern Buh River, $[\text{m}^3\text{s}^{-1}/\text{days}]$

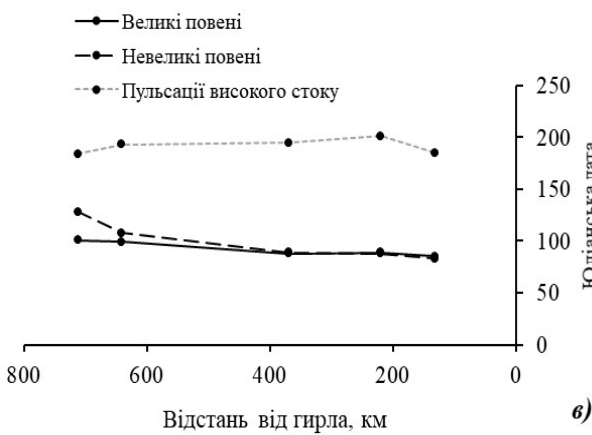
Гідрологічний пост	Великі повені	Невеликі повені	Пульсації високого стоку
Пирогівці	4,39 / -2,20	1,27 / -0,75	0,82 / -0,41
Лелітка	25,3 / -5,92	8,67 / -3,03	2,89 / -1,81
Тростяничик	102 / -35,6	34,5 / -12,2	11,4 / -7,93
Підгір'я	112 / -34,8	40,4 / -13,7	13,5 / -8,28
Олександрівка	154 / -48,9	56,0 / -21,7	18,9 / -1,04



a)



b)



c)

Рис. 5. – Середня тривалість (а), середня частота (б) і середні юліанські дати піків (в) складових водного стоку на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг

Fig. 5. – Mean duration (a), mean frequency (b) and mean Julian dates peaks (c) of different flow types at gauge stations along the Southern Buh River

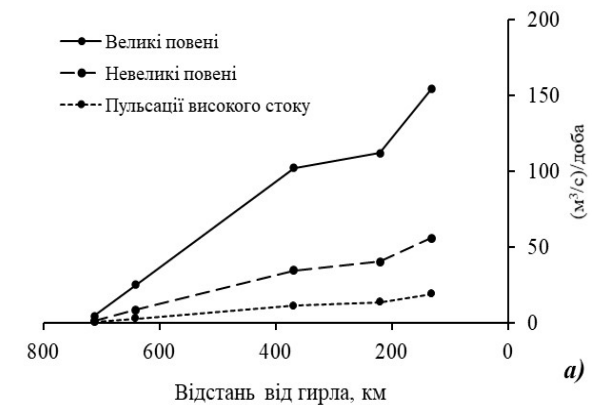
На рис. 7 наведено зміни з часом характеристик великих повеней на прикладі спостережень на гідрологічних постах у верхів'ї та середній течії р. Південний Буг.

За період спостережень величини максимальних витрат води великих повеней мають тенденцію до зменшення. Разом з цим, тривалість ве-

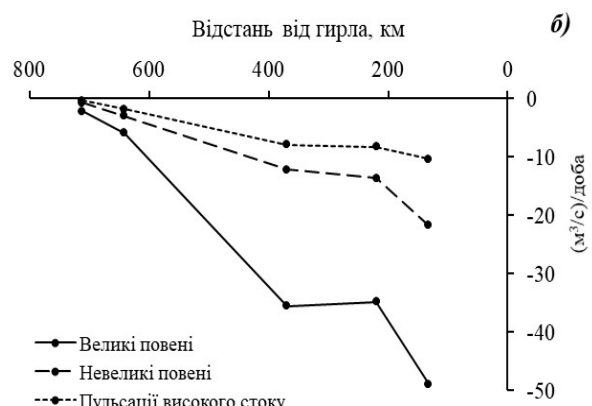
ликих повеней значно збільшилась. Максимальні витрати великих повеней почали наставати пізніше у верхів'ї річки. Однак, загалом у замикальному створі біля смт Олександрівка дати настання максимальних витрат води великих повеней не зазнали суттєвих змін.

Тенденції характеристик невеликих повеней загалом співпадають з тенденціями великих повеней, окрім величин максимальних витрат біля смт Олександрівка, які з часом не зазнали змін (рис. 8).

Разом з цим, аналіз характеристик пульсацій високого стоку вздовж річки свідчить про відсутність будь яких суттєвих тенденцій з часом (рис. 9). Загалом отримані тенденції високого (максимального) стоку у басейні р. Південний Буг співпадають з тенденціями, які отримано у роботах інших вчених як для басейну р. Південний Буг, так і для інших рівнинних річок України [20, 24, 25]. Особливо це стосується великих повеней. Разом з цим, використання методу ІНА дозволяє деталізувати високий стік і виконати розширений аналіз за багатьма



a)



b)

Рис. 6. – Інтенсивність росту витрат води на підйомі (а) та інтенсивність зниження витрат води на спаді (б) високого стоку на гідрологічних постах вздовж р. Південний Буг
Fig. 6. – Intensity of discharges increase on rise (a) and intensity of discharges decrease on recession (b) of high flow at gauge stations along the Southern Buh River

показниками. Це значно пришвидшує і спрощує дослідження. Окрім цього, це дозволило у даному дослідженні вперше виявити і деякі особливості змін у різних класах високого стоку. Так,

найбільш значимі зміни виявлено для великих повеней, тоді як для пульсацій високого стоку будь-яких суттєвих змін виявлено не було.

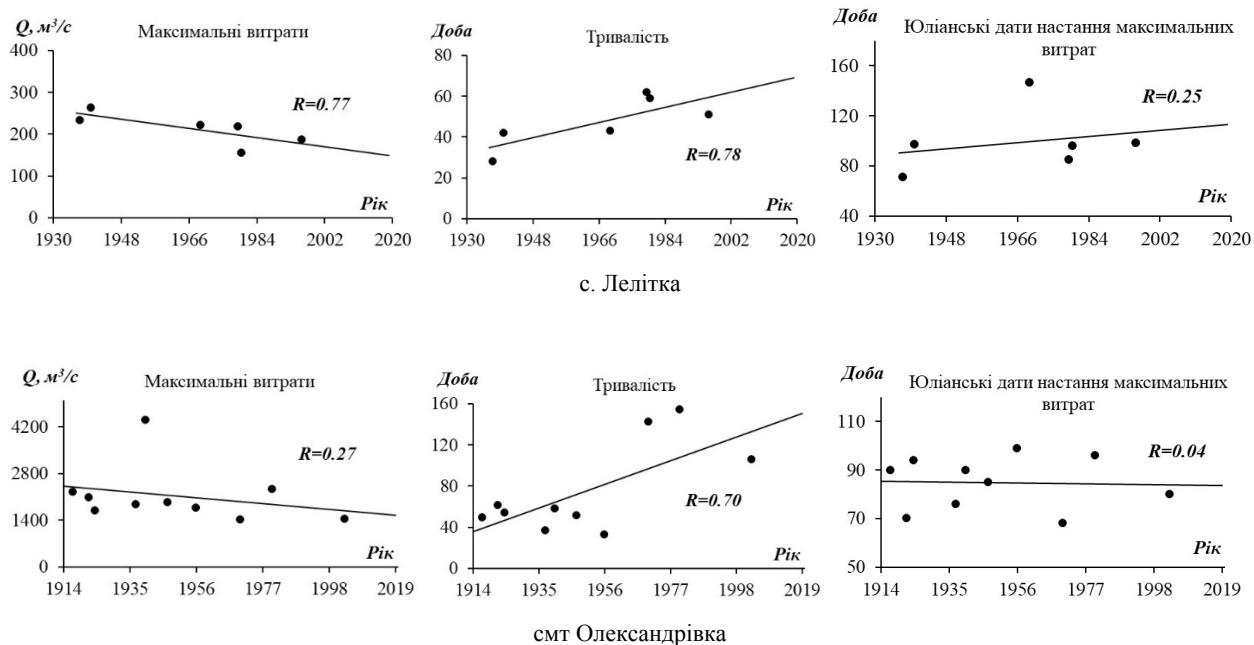


Рис. 7. – Виявлення тенденцій змін характеристик великих повеней вздовж р. Південний Буг

Fig. 7. – Identification of trends in the characteristics of large floods along the Southern Buh River

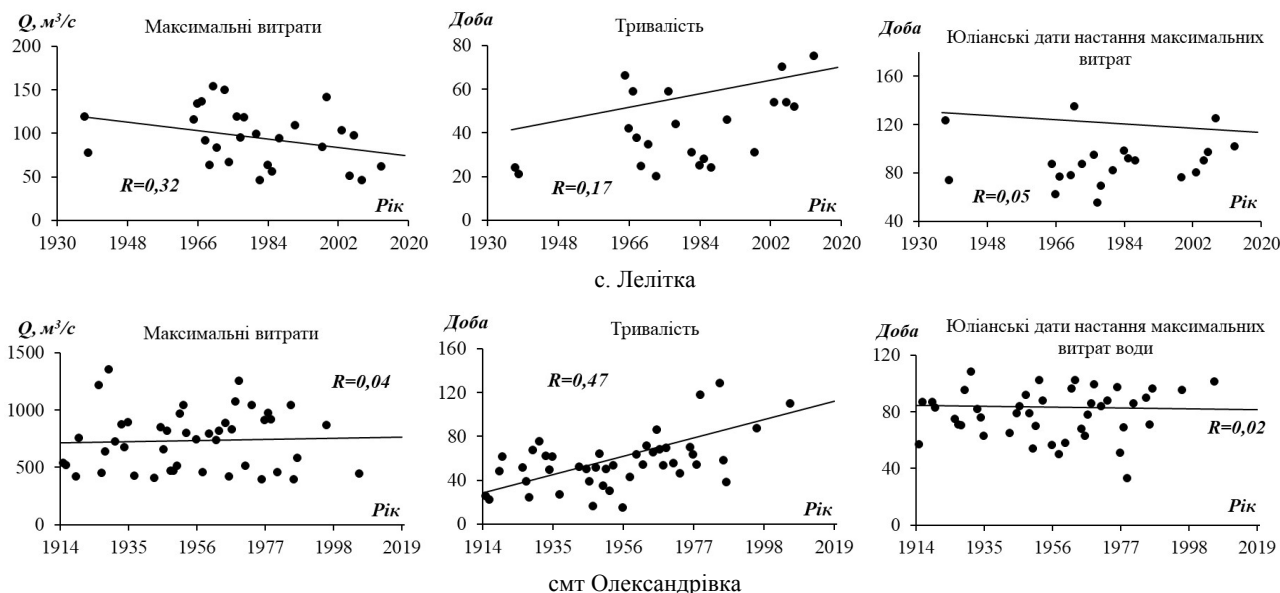


Рис. 8. – Виявлення тенденцій змін характеристик невеликих повеней вздовж р. Південний Буг

Fig. 8. – Identification of trends in the characteristics of small floods along the Southern Buh River

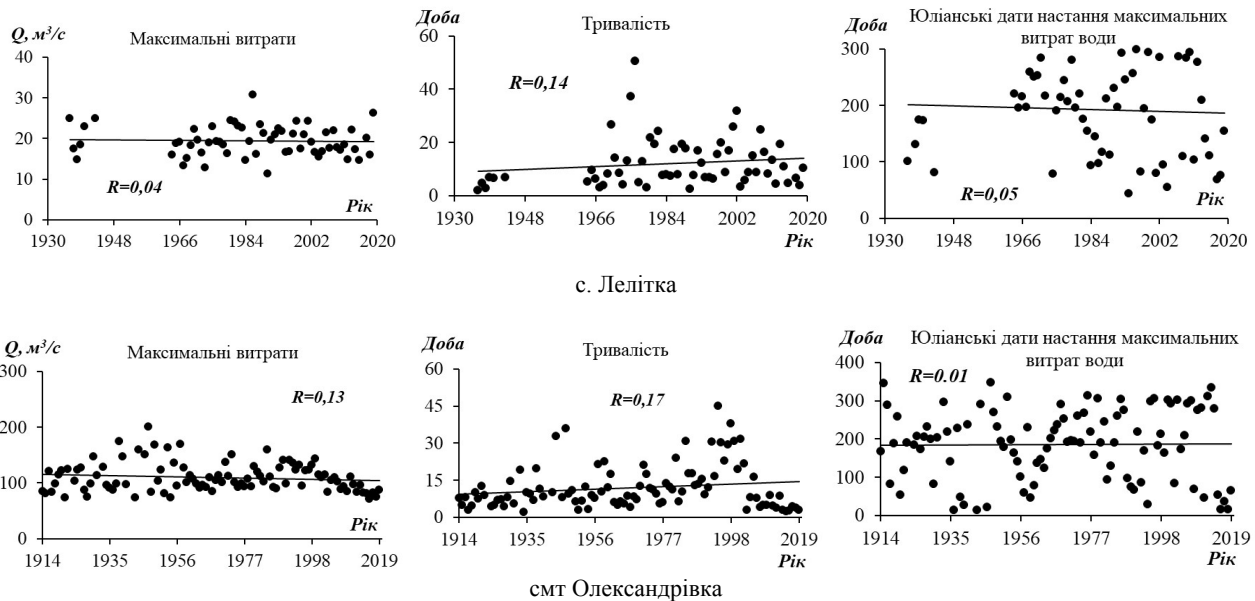


Рис. 9. – Виявлення тенденцій змін характеристик пульсацій високого стоку вздовж р. Південний Буг
 Fig. 9. – Identification of trends in the characteristics of high-flow pulses along the Southern Buh River

4. ВИСНОВКИ

Метод Indicators of Hydrologic Alteration широко використовується у світі для виявлення та аналізу тенденцій у змінах гідрологічного режиму водних об'єктів. Таким дослідженням присвячена велика кількість наукових робіт, частина з яких розглядалась і в даній роботі. Застосування цього методу для дослідження українських річок вперше дозволило отримати нові знання та розширити уявлення щодо дослідження статистичних показників водного стоку річки Південний Буг.

За допомогою методу ІНА у дослідженні отримано наступні результати:

- Аналіз середньомісячних багаторічних витрат води показав, що настання найбільшої водності р. Південний Буг біля с.т. Олександрівка визначається вагомих впливом її лівої притоки – річкою Синюха.

- Виконано розподіл гідрографів за характеристиками стоку у різні фази водного режиму для 5 гідрологічних постів уздовж річки Південний Буг за розрахованими пороговими значеннями витрат води.

- Значення основних статистичних показників, які розраховано у роботі для високого стоку, поступово зростають у напрямку від витoku до гирла, що повністю відповідає фізико-географічним умовам його формування. Разом з цим, було виявлено і деякі особливості високого стоку. Так, найбільшу тривалість невеликі пове-

ні та пульсацій високого стоку мають у верхів'ї річки.

- У середньому на р. Південний Буг великі повені повторюються 1 раз на 10 років, невеликі – 1 раз на 2 роки, пульсації високого стоку – 4-8 раз на рік у верхів'ї та 9-14 раз на рік у середній течії.

- У верхів'ї річки у середньому за юліанськими датами піки великих повеней спостерігаються в першій декаді квітня, невеликих повеней – першій декаді травня, у середній течії – у третій декаді березня, а пульсації високого стоку вздовж річки – в першій-другій декаді липня.

- Аналіз тенденцій у коливаннях характеристик високого стоку показав, що з часом величини максимальних витрат води великих та невеликих повеней мають тенденцію до зменшення, а їхня тривалість суттєво збільшилася. Виятком є максимальні витрати води невеликих повеней біля с.т. Олександрівка, які з часом не зазнали змін. За період спостережень для характеристик пульсацій високого стоку вздовж річки не виявлено будь яких суттєвих змін.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Linnerooth-Bayer J., Amendola A. Introduction to special issue on flood risks in Europe. *Risk Analysis*. 2003. 23(3). Pp. 537-543. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00334>
2. Blöschl G. et al. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*. 2017. 357(6351). Pp. 588-590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
3. Гопченко Є. Д., Овчарук В. А. Сучасна методика нормування характеристик максимального стоку

- весняного водопілля рівнинних річок України. *Український географічний журнал*. 2018. № 2. С. 26-33. <https://doi.org/10.15407/ugz2018.02.026>
4. Barroca B. Vulnerability, urban design and resilience management. *Natural Hazards - Risk Assessment and Vulnerability Reduction* / Edited by José Simão Antunes Do Carmo. London: IntechOpen, 2018. Pp. 3-16. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78585>
 5. Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia / Tananaev N. I., Efremova V. A.; Gavrilyeva T. N.; Parfenova O. T. *Hydrology Research*. 2020. In press. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.124>
 6. Webster P. J., Jian J. Environmental prediction, risk assessment and extreme events: adaptation strategies for the developing world. *Phil. Trans. Roy. Soc. A (Math, Phys and Eng.)*. 2011. 369. Pp. 1-30. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0160>
 7. Pham N. T. T., Nong D., Sathyan A. R., Garschagen M. Vulnerability assessment of households to flash floods and landslides in the poor upland regions of Vietnam. *Climate Risk Management*. 28. 2020. Pp. 1002152. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100215>
 8. Assessing river flood risk and adaptation in Europe-review of projections for the future / Kundzewicz Z. W. et al. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2010. 15(7). Pp. 641-656. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9213-6>
 9. Floods and climate: Emerging perspectives for flood risk assessment and management / Merz B. et al. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 2014. 2. Pp. 1559-1612. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1921-2014>
 10. A new flood type classification method for use in climate change impact studies / Turkington T. et al. *Weather and Climate Extremes*. 2016. 14. Pp. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.10.001>
 11. Knighton J., Steinschneider S., Todd Walter M. A. Vulnerability based, bottom up assessment of future riverine flood risk using a modified peaks over threshold approach and a physically based hydrologic model. *Water Resources Research*. 2017. 53. Pp. 10,043-10,064. <https://doi.org/10.1002/2017WR021036>
 12. Tabari H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Nature. Sci. Rep.* 2020. 10(1). Pp. 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
 13. Горбачова Л. Місце та роль гідролого-генетичного аналізу серед сучасних методів дослідження водного стоку річок. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2016. Вип. 268. С. 73-81.
 14. Statistical analysis of hydrological regime of the Danube River at Ceatal Izmail Station / Pekarova P., Gorbachova L., Vacová Mitkova V. et al. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019. 221(012035). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012035>
 15. How much water does a river need? / Richter B. et al. *Freshwater Biology*. 1997. 37(1). Pp. 231-249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>
 16. Development of representative indicators of hydrologic alteration / Gao Y. et al. *Journal of Hydrology*. 2009. 374(1). Pp. 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.009>
 17. Assessment of the degree of hydrological indicators alteration under climate change / Yu C. et al. *Proceedings of the 6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017)*. *Advances in Engineering Research (AER)*. Atlantis Press, 2017. Vol. 143. Pp. 210-216.
 18. The nature conservancy indicators of hydrologic alteration. Version 7. User's manual. 2009. 75 p. <https://www.conservationgateway.org/Documents/IHAV7.pdf> (Accessed: 12 February 2021)
 19. Ресурси поверхневих вод СССР. Описание рек и озер и расчеты основных характеристик их режима. Украина и Молдавия. Вып. 2. Срнее и нижнее поднепровье / под ред. М. С. Каганер. Ленинград: Гидрометеиздат, 1967. 492 с.
 20. Шакирзанова Ж. Р. Довгострокове прогнозування характеристик максимального стоку весняного водопілля рівнинних річок та естуаріїв території України: монографія. Одеса: ФОП Бондаренко М.О., 2015. 252 с.
 21. Горбачова Л. О., Васильева О. С. Строки та тривалість періодів і сезонів водогосподарського року в басейні річки Південний Буг. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2013. Вип. 265. С. 39-45.
 22. Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу / за ред. В.К. Хільчевського. Київ: Ніка-Центр, 2009. 182 с.
 23. Bauzha T., Gorbachova L. The features of the cyclical fluctuations, homogeneity, and stationarity of the average annual flow of the Southern Buh River basin. *Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series*. 2017. 17(1). Pp. 5-17.
 24. Овчарук В. А. Максимальний стік весняного водопілля річок України: розрахункові моделі та їх реалізація: дис...д-ра. геогр. наук / ОДЕКУ. Одеса, 2017. 568 с.
 25. Горбачова Л. О., Барандіч С. Л. Просторово-часова мінливість максимального стоку води весняного водопілля та паводків змішаного походження річок України. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2016. Вип. 269. С. 107-114.

REFERENCES

1. Linnerooth-Bayer, J. & Amendola, A. (2003). Introduction to Special Issue on Flood Risks in Europe. *Risk Analysis*, 23(3), pp. 537-543. <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00334>
2. Blöschl, G. et al. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), pp. 588-590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
3. Ovcharuk, V.A. & Hopchenko, Ye.D. (2018). [The modern method of maximum spring flood runoff characteristics valuation for the plan rivers of Ukraine]. *Ukr. geogr. ž. [Ukrainian Geographic Journal]*, 2, pp. 26-33. (in Ukr.)
4. Barroca, B. (2018). Vulnerability, Urban Design and Resilience Management. In: José Simão Antunes Do Carmo (eds). *Natural Hazards - Risk Assessment and Vulnerability Reduction*. London: IntechOpen, pp. 3-16. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.78585>
5. Tananaev, N.I., Efremova, V.A., Gavrilyeva, T.N., Parfenova, O.T. (2020). Assessment of the community vulnerability to extreme spring floods: the case of the Amga River, central Yakutia, Siberia. *Hydrology Research*. In press. <https://doi.org/10.2166/nh.2020.124>
6. Webster, P.J. & Jian, J. (2011). Environmental prediction, risk assessment and extreme events: adaptation strategies for the developing world. *Phil. Trans. Roy. Soc. A (Math, Phys and Eng.)*, 369, pp. 1-30. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0160>
7. Pham, N.T.T. et al (2020). Vulnerability assessment of

- households to flash floods and landslides in the poor upland regions of Vietnam. *Climate Risk Management*, 28, pp. 1002152. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100215>
8. Kundzewicz, Z.W. et al. (2010). Assessing river flood risk and adaptation in Europe-review of projections for the future. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(7), pp. 641-656. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9213-6>
 9. Merz, B. et al. (2014). Floods and climate: Emerging perspectives for flood risk assessment and management. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss*, 2, pp. 1559-1612. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1921-2014>
 10. Turkington, T. et al. (2016). A new flood type classification method for use in climate change impact studies. *Weather and Climate Extremes*, 14, pp. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.10.001>
 11. Knighton, J., Steinschneider, S. & Todd Walter, M. (2017). A vulnerability based, bottom up assessment of future riverine flood risk using a modified peaks over threshold approach and a physically based hydrologic model. *Water Resources Research*, 53, pp. 10,043-10,064. <https://doi.org/10.1002/2017WR021036>
 12. Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Nature. Sci. Rep.*, 10(1), pp. 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
 13. Gorbachova, L. (2016). [Place and role of hydro-genetic analysis among modern research methods runoff]. *Naukovi pratsi Ukrainського naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu. [Proceedings of Ukrainian Hydrometeorological Institute]*, 268, pp. 73-81. (in Ukr.)
 14. Pekarova, P., Gorbachova, L., Bacová Mitkova, V. et al. (2019). Statistical analysis of hydrological regime of the Danube River at Ceatal Izmail Station. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 221(012035). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/221/1/012035>
 15. Richter, B. et al. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 37(1), pp. 231-249. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x>
 16. Gao, Y. et al. (2009). Development of representative indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology*, 374(1), pp. 136-147. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.009>
 17. Yu, C. et al. (2017). Assessment of the degree of hydrological indicators alteration under climate change. *Proceedings of the 6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017). Advances in Engineering Research (AER)*. Atlantis Press, vol. 143, pp. 210-216.
 18. *Engineering Research (AER)*. Atlantis Press, vol. 143, pp. 210-216.
 19. *The Nature conservancy indicators of hydrologic alteration* (2009). Version 7. User's manual, 75 p. <https://www.conservationgateway.org/Documents/IHAV7.pdf> (Accessed: 12 February 2021)
 20. Kaganer, M.S. (ed.). (1967). *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Opisanie rek i ozer i raschety osnovnykh kharakteristik ikh rezhima [Resources of surface water of the USSR. Description of rivers and lakes and calculations of the main characteristics of their regime]*. Issue 2: *Ukraina i Moldaviya. Srednee i nizhnee podneprov'e. [Ukraine and Moldova. The Middle and Lower Dnieper]*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (in Russ.)
 21. Shakirzanova, Zh.R. (2015). *Dovhostrokovye prohozuvannia kharakteristik makyimalnoho stoku vesnianoho vodopilia rivnynykh richok ta estuariiv terytorii Ukrainy [Long-term forecasting of characteristics maximum runoff spring flood plain rivers and estuaries in Ukraine]*. Odesa: FOP Bondarenko M.O. Publ. (in Ukr.)
 22. Gorbachova, L.O. & Vasul'eva O.S. (2013). [Terms and duration of periods and seasons of water economic year in the Southern Bug River Basin]. *Naukovi pratsi Ukrainського naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu. [Proceedings of Ukrainian Hydrometeorological Institute]*, 265, pp. 39-45. (in Ukr.)
 23. Khilchevskyi, V.K. (ed.). (2009). *Vodni resursy ta yakist richkovykh vod baseinu Pivdennoho Buhu [Water resources and quality of river waters in the Pivdenny Bug Basin]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. (in Ukr.)
 24. Bauzha, T. & Gorbachova, L. (2017). The features of the cyclical fluctuations, homogeneity, and stationarity of the average annual flow of the Southern Buh river basin. *Annals of Valahia University of Targoviste. Geographical Series*, 17(1), pp. 5-17.
 25. Ovcharuk, V.A. (2017). *Maksimalnyi stik vesnianoho vodopillia richok Ukrainy: rozrakhunkovi modeli ta ikh realizatsiia [Maximum runoff of spring flood on Ukrainian rivers: calculation models and their implementation]*. Thesis of Dr. Sc. in Geography. Odessa State Environmental University. Odesa. (in Ukr.)
 26. Gorbachova, L.O. & Barandich, S.L. (2016). [Spatio-temporal fluctuations of maximum flow of spring floods and snow-rain floods of Ukrainian rivers]. *Naukovi pratsi Ukrainського naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu. [Proceedings of Ukrainian Hydrometeorological Institute]*, 269, pp. 107-114. (in Ukr.)

STATISTICAL ANALYSIS OF MAXIMUM RUNOFF OF THE SOUTHERN BUH RIVER USING THE METHOD OF INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION

L. O. Gorbachova, V. S. Prykhodkina, B. F. Khrystiuk,
T. O. Zabolotnia, V. O. Rozlach

Ukrainian Hydrometeorological Institute,
37, Nauky Avenue, Kyiv, 03028, Ukraine,
gorbachova@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1033-9385>

Knowledge of maximum river runoff trends is of great practical importance, especially for design and operation of hydraulic structures. This article presents the results of the research of the

Southern Buh River's maximum runoff. The water of the river is widely used for hydropower engineering, industrial and municipal water supply, agriculture, irrigation, shipping, tourism etc.

The research of the maximum runoff was based on the Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) method which is widely used in the whole world. This method enables calculation of quantitative statistical characteristics of rivers', lakes', reservoirs' runoff and determination of the degree of their hydrological regime changes. The IHA is used for water bodies having natural or regulated runoff. However, the IHA method was not widely used in Ukraine before.

The purpose of this publication is using the Indicators of Hydrologic Alterations method in order to study the characteristics of maximum runoff and their changes along the Southern Buh River.

The research was carried out based on the data of observations at 5 gauge stations located along the Southern Buh River. The research uses the mean daily discharges that has been recorded since the beginning of observations up to 2018 and 2019 inclusive. The river's runoff at each of gauge stations was divided into five components: "Extremely low runoff", "Low runoff", "High runoff pulses", "Small floods", "Large floods". This made it possible to separate three classes of high (maximum) runoff, for which the IHA statistics were calculated, from the total runoff.

It was discovered that the long-term high runoff changes differed in each of its three components, although they had general trends. The most significant changes were found for large floods, with no significant changes found for high runoff pulses. General trends of high runoff showed that over time the values of maximum discharges tend to decrease, with the increasing duration of high runoff periods.

The values of the main statistical indicators of high runoff gradually increase from the river's source to its mouth, which fully corresponds to the physical and geographical conditions of its formation. Nevertheless, some features of high runoff were still found. Thus small floods and high runoff pulses have the largest duration in the upper reach of the river.

On average, the Southern Buh River experiences large floods once in every 10 years, small floods – once in every 2 years, high runoff pulses – 4-8 times a year in its upper reach and 9-14 times a year in its middle reach.

Keywords: maximum runoff; the Southern Buh River; statistical analysis; mean daily discharges; the IHA

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА ВОДЫ РЕКИ ЮЖНЫЙ БУГ ПО МЕТОДУ «INDICATORS OF HYDROLOGIC ALTERATION»

Л. А. Горбачёва, В. С. Приходькина, Б. Ф. Христюк,
Т. А. Заболотня, В. О. Розлач

Український гідрометеорологічний інститут,
проспект Науки, 37, г. Київ, 03028, Україна,
gorbachova@uhmi.org.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1033-9385>

Знання о тенденциях максимального стока рек имеют важное практическое значение, особенно для проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений. В данной статье представлены результаты исследования максимального стока реки Южный Буг. Вода реки широко используется для гидроэнергетики, промышленного и коммунального водоснабжения, сельского хозяйства, орошения, судоходства, туризма и т.п.

В работе для исследования максимального стока воды использован метод «Indicators of Hydrologic Alteration» (IHA), который широко применяется в мире. Этот метод позволяет рассчитывать количественные статистические характеристики водного стока рек, озер, водохранилищ и определять степень изменений их гидрологического режима. IHA используют для водных объектов, которые имеют природный или зарегулированный сток. Однако, в Украине метод IHA все ещё не получил широкого распространения.

Целью работы является использование метода «Indicators of Hydrologic Alteration» для

исследования характеристик максимального стока воды и его изменений вдоль реки Южный Буг.

Исследование выполнено по данным наблюдений 5 гидрологических постов, которые расположены вдоль реки Южный Буг. Использовались ежедневные среднесуточные расходы воды с начала наблюдений по 2018 и 2019 гг. включительно. Водный сток реки на каждом гидрологическом посту был разделен на пять составляющих: «*Extreme low flows*» (чрезвычайно низкий сток), «*Low flows*» (низкий сток), «*High-flow pulses*» (пульсации высокого стока), «*Small floods*» (небольшие паводки), «*Large floods*» (большие паводки). Это позволило выделить из общего стока воды три класса высокого (максимального) стока, для которых и были рассчитаны статистические показатели ИНА.

Показано, что долговременные изменения высокого стока отличаются в каждом из трёх его компонентов, хотя и имеют общие тенденции. Наиболее значимые изменения обнаружены для больших паводков, тогда как для пульсаций высокого стока, наоборот, не было выявлено значительных изменений. Общие тенденции высокого стока показывают, что со временем величины максимальных расходов воды имеют тенденцию к уменьшению, а продолжительность периодов с высоким стоком увеличивается.

Значения основных статистических показателей высокого стока постепенно увеличиваются от истока к устью реки, что полностью соответствует физико-географическим условиям его формирования. Тем не менее, обнаружены некоторые особенности высокого стока. Так, наибольшая продолжительность небольших паводков и пульсаций высокого стока наблюдается в верховье реки.

В среднем на р. Южный Буг большие паводки повторяются 1 раз в 10 лет, небольшие – 1 раз в 2 года, пульсации высокого стока – 4-8 раз в год в верховье и 9-14 раз в год в средней части реки.

Ключевые слова: максимальный сток; река Южный Буг; статистический анализ; ежедневные расходы воды; ИНА

Подання до редакції : 22. 02. 2021

Надходження остаточної версії : 22. 03. 2021

Публікація статті : 30. 06. 2021