

Ймовірно-прогностичний метод для визначення меженних витрат води річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра

Жаннетта Шакірманова¹,

д. геогр. н., професор кафедри гідрології суші,

¹Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна,
e-mail: jannetodessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5657>;

Валерія Овчарук¹,

д. геогр. н., професор, директор навчально-наукового гідрометеорологічного інституту,
e-mail: valeriya.ovcharuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5654-3731>;

Ангеліна Докус¹,

к. геогр. н., ст. викладач кафедри гідрології суші,
e-mail: angel.dokus@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0912-6411>;

Лілія Кущенко¹,

здобувач кафедри гідрології суші,
e-mail: liliakushchenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6770-1627>;

Тимко Олена¹,

аспірант кафедри гідрології суші
e-mail: elenatymko2018@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8410-340X>

Меженний стік формується за рахунок виснаження як запасів ґрунтових вод, так і руслових запасів, які ще залишаються у річковій мережі, озерах та болотах після припинення подачі поверхневих тало-дощових вод весняного водопілля. Але природний режим меженного стоку може бути порушений через антропогенне втручання у руслі річки чи на водозборі, впливу зміни клімату, у зв'язку з дефіцитом опадів, у поверхневому і підземному стоці та формуванням гідрологічних посух з нестачею природної води. Саме досліджувана територія перебуває в зоні суттєвого ризику внаслідок дефіциту водних ресурсів, формування екстремально низького стоку у меженний період, що потребує його визначення і прогнозування. В роботі обґрунтовано ймовірно-прогностичний метод для прогнозування меженних витрат води (літнього, осіннього та зимового періодів). В його основу покладено побудову регіональних залежностей середньодекадних модулів стоку від попередніх витрат води для груп басейнів річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра (з урахуванням кліматичних закономірностей розподілу опадів територією) та встановлення ймовірнісних характеристик меженних витрат води у багаторічному періоді. В цілому методика територіальних короткострокових прогнозів середньодекадних витрат води меженного літнього, осіннього та зимового стоку річок оцінюється як задовільна при забезпеченості допустимої похибки від 70 до 97 %, при числі членів ряду понад 500 точок. Для визначення забезпеченості прогнозних величин середньодекадних витрат води літньої, осінньої та зимової межні встановлений емпіричний розподіл середньомісячних витрат води в сезони межні для груп річок басейнів Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра. Для оцінки розмірів очікуваної межні у кожному році запропоновано представляти прогнозні величини витрат води на підставі карто-схем модулів меженного стоку, а також їх ймовірнісних величин. Такі карто-схеми прогнозних модулів меженних витрат води дозволяють здійснити просторовий моніторинг та оцінити ступінь маловоддя на річках в цілому всього досліджуваного регіону, включаючи й ті річки, по яких спостереження за стоком відсутні. Карто-схеми ймовірнісних характеристик меженних витрат води дають можливість оцінки виникнення низького стоку, навіть при досягненні його значень близьких до екологічних витрат води, що є критичним показником для функціонування екосистеми річки.

Ключові слова: меженні витрати води, територіальний прогноз, ймовірнісні характеристики, картографічна форма прогнозу.

Як цитувати: Шакірманова Жаннетта. Ймовірно-прогностичний метод для визначення меженних витрат води річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра / Жаннетта Шакірманова, Валерія Овчарук, Ангеліна Докус та ін. // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2022. – Вип. 57. – С. 251-267. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-19>

In cites: Shakirmanova Zhannetta, Ovcharuk Valeriya, Dokus Anhelina, Kushchenko Liliia, Tymko Olena (2022). Probabilistic-forecasting method for determination of low flow discharge of Pivdennyi Buh, Black Sea area, and Lower Dnieper rivers. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (57), 251-267. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-19> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Формування стоку річок в меженний період відбувається за рахунок виснаження як запасів ґрунтових вод, так і руслових запасів, які ще залишаються у річковій мережі, озерах та болотах після припинення подачі поверхневих тало-дощових вод весняного водо-

пілля [1], [2]. На річках переважно снігового живлення під меженим періодом прийнято розуміти літній та зимовий [3], або літньо-осінній періоди [4], [5]. На рівнинних річках цей період починається із закінченням спаду весняної повені. Власне під терміном "межень" зазвичай розумі-

ються найнижчі річні (літня межень) або зимові (зимова межень) витрати та рівні води в річках, коли живлення річок відбувається переважно шляхом підземних вод. Однак в літній та осінній періоди багато річок тою чи іншою мірою отримують додаткове живлення за рахунок дощів, а в зимовий час за поверхневого стоку під час відлиг, що є характерним явищем, особливо, для річок південного регіону України. В цілому ж, регіональні особливості формування меженного стоку річок відбувається у зв'язку з кліматичними закономірностями розподілу опадів та випаровування над їх басейнами.

Антропогенне втручання у руслі річки (створення гідротехнічних споруд, використання поверхневих вод для зрошення, вилучення ґрунтових вод для сільськогосподарських, промислових та побутових потреб та ін.) чи на водозборі (регулювання стоку, міжбасейновий перерозподіл стоку, зміни у землекористуванні, такі як вирубування та відновлення лісу або урбанізація) може сильно впливати на природний режим меженного стоку [2].

В умовах сучасної зміни клімату, що супроводжується зростанням багаторічного ходу глобальних [6] та регіональних температур повітря [7], тенденцій у зв'язку з цим до підвищення абсолютної вологості та, своєю чергою, зниження відносної вологості, що впливає на величину випаровування з поверхні водозборів і водойм [8], перерозподілом опадів у часі та просторі [9], зміщенням сезонів у році [10], [11] спостерігаються й зміни сучасної та, навіть, майбутньої водності річок [12]-[21], розподіл стоку річок протягом року [15,22].

Так, виникнення тривалих метеорологічних посух як у минулому [8], так і майбутньому [23], пов'язаних з впливом дефіциту як рідких, так і твердих опадів на поверхневий і підземний стік, призводить до гідрологічних посух з нестачею природної води нижче середніх показників водності [2, 24]. Саме територія південних регіонів України перебуває в зоні суттєвого ризику внаслідок дефіциту водних ресурсів, формуванням екстремально низького стоку у меженний період, так званих «екологічних» витрат води, що є критичним показником для функціонування екосистеми річки [25],[26] і, майже, висихання водойм, озер, струмків, річок і зниження рівня підземних вод, зниження вмісту води у ґрунті [2, 27].

Статистичний аналіз гідрологічних посух (маловоддя) є суттєвим елементом в оцінці можливості використання водних ресурсів річкового басейну для цілей водного господарства [25],[26]. За прогнозними кліматичними сценаріями у найближчі 30–50 років тенденції дефіциту водних ресурсів будуть тільки посилюватись [12]-[21].

Розробка науково-обґрунтованого методу про-

гнозування меженних витрат води в умовах сучасних кліматичних змін із визначенням ймовірності їх настання у багаторічному періоді, як й прогнозів весняного максимального стоку річок [28]-[30], є важливим науковим та практичним завданням у зв'язку з необхідністю раціонального використання водних ресурсів регіону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Перші пропозиції по прогнозам літнього та осіннього стоку рівнинних річок полягали у встановленні суто емпіричних залежностей між величинами цього стоку за той чи інший проміжок часу та його гідрометеорологічними чинниками [31], [32]. Однак такі залежності, як правило, мають низьку точність у зв'язку не визначеністю останніх на тривалий період прогнозування стоку і тому в наш час вони порівняно рідко використовуються.

У програмах Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) [1], [2] середньострокові та короткострокові прогнози меженного стоку базуються на характеристиках виснаження стоку в басейні, при врахуванні антропогенного впливу, наприклад, забір води на зрошення, локальні відмінності зволоженості водозбору, що можуть привести до формування різного базисного стоку з окремих частин водозборів та ін.

Довгострокові прогнози меженного стоку майже завжди базуються на методах кореляційного або регресійного аналізу з урахуванням ґрунтової вологи та кліматичних характеристик, а саме дощових опадів і температури повітря, як визначальних змінних. Зазвичай в опадах за попередній період виділяються окремі сезонні складові, які входять в рівняння зв'язку з відносними ваговими коефіцієнтами. Також виділення сезонних опадів допомагає визначити час запізнювання в системі опади – стік [33], [34].

Ще одним підходом є використання довгострокових рядів стоку або водно-балансових моделей, заснованих на історичних кліматологічних даних для забезпечення ймовірнісних прогнозів низького стоку. Також для прогнозування меженного стоку потрібні оцінки фільтрації води в берега і випаровування з водної поверхні. Це має істотний вплив при прогнозуванні впливу попусків води з водосховища, а також впливу інших водогосподарських заходів [35].

В закордонній практиці, розроблені та використовуються математичні моделі гідрографів стоку річок, у тому числі й меженного, з різною деталізацією процесів стокоутворення. Так, комплексна система гідрологічного моделювання – концептуальна гідрологічна модель HBV (Hydrologiska Byrans Vatten balansavdelning model) розроблена у Шведському метеорологічному та гідрологічному інституті (SMHI), що дозволяє виконувати без-

перервний розрахунок річкового стоку на басейні (періоду весняного водопілля, зимових та осінніх паводків та межені) [36]. Це одна з перших моделей, яка розроблена ще на початку 70-х років з метою підвищення якості управління гідроенергетичного комплексу.

До математичних прогностичних моделей відносяться модель Сакраменто (розроблена в Національному центрі служби річкових прогнозів Сакраменто, США) [37], LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) [38], гідродинамічні математичні моделі з розподіленими параметрами – Європейська гідрологічна система (SHE) [39], модель DHSWM (Distributed Hydrology Soils and Vegetation Model), розробка американських вчених університету в Сіетлі [40], моделі WAVOS [41], FLORIS 2000 з урахуванням зарегульованості стоку гідровузлами [42], модель типу HBV – COSERO (безперервна напіврозподілена модель) [43], модель MIKE11 гідродинамічна модель для оперативного прогнозу стоку різноманітних характеристик будь-якого річкового водозбору [44], детерміністична концептуальна та напіврозподілена модель NHFS [45] та ін.

Прогностичні математичні моделі враховують витрати води основних приток або включають систему диференціальних рівнянь, що описують такі фізичні процеси на басейні, як затримання опадів рослинністю, сумарне випаровування, схиловий та руслової стік, рух води в зоні аерації та зоні насичення та сніготанення. Прогнози за моделями відносяться до короткострокових і мають завчасність від 12-24 годин та до 1-7 діб, випускаються для великої кількості постів та регулярно наводяться на офіційних веб-сайтах.

Серед досліджень останніх років слід зазначити роботу колективу французьких авторів [46], які розробили та застосували на прикладі невеликого гірського водозбору Французьких Альп, методику основу на імітаційному моделюванні низького стоку. Двовірний генератор добових значень температури повітря та опадів, розроблений авторами у співпраці з університетом Париж-Сакле оснований на схованих ланцюгах Маркова та дозволяє генерувати велику кількість часових рядів температури та опадів, які є вхідними даними у гідрологічній моделі MORDOR (Modèle à Réservoirs de Détermination Objective du Ruissellement). Використання цієї моделі дає можливість спрогнозувати величину мінімального стоку під впливом кліматичних змін.

Однак, як правило, чим точніше та детальніше модель описує гідрологічні процеси на водозборі річки, тим більше вхідних даних вона потребує. Однак, не завжди ці дані є у наявності, що часто і унеможливує використання подібних моделей на практиці.

В останні роки в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України (УкрГМІ) розроблено метод прогнозів характерних декадних рівнів води на гідрологічних постах нижньої частини Дунаю та впроваджено з 2015 р. у виробничу діяльність Дунайської гідрометеорологічної обсерваторії (м. Ізмаїл) аналітично-експертну систему прогнозування щоденних, характерних декадних та місячних рівнів води для пунктів суднохідного Дунаю – «Істер» (автор Б.Ф. Христюк) [47]. В її основу покладено методику прогнозу рівневого режиму Кілійського рукава р. Дунай, яка спирається на встановлення емпіричних залежностей зміни рівнів води поста Ізмаїл від зміни рівнів води на вище розташованому посту Рені на фоні середньобігаторічного вітрового режиму морського узбережжя дельти Дунаю.

Авторами даного дослідження в низці публікацій розглядалась можливість використання індексів посух, зокрема SPEI, для розрахунків та прогнозів різних фаз водного режиму й межені у тому числі [48, 49].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. В умовах зростання прояв екстремальності клімату для раціонального використання водних ресурсів зони недостатньої водності південного регіону країни набуває актуальності удосконалення методик прогнозування низького стоку періоду сезонної межені річок. На даний час прогнози межених витрат води різної їх завчасності складаються для багатьох річок як в літньо-осінній, так і в зимовий періоди. Однак методичні основи територіальних прогнозів стоку цього періоду та встановлення їх ймовірнісних характеристик, майже не розроблені, на відміну від, наприклад, прогнозів весняного максимального стоку річок [28]-[30]. Перевагою територіальної методики прогнозування межених витрат води в річках є те, що такий підхід дає змогу їх визначення й для річок, на яких відсутні безпосередні спостереження за стоком при визначенні ймовірнісних характеристик їх настання.

Формулювання мети статті. Основною метою дослідження є обґрунтування ймовірнісно-прогностичного методу для прогнозування межених витрат води та його реалізація для річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра з урахуванням кліматичних закономірностей розподілу опадів територією та встановлення ймовірнісних характеристик межених витрат води у багаторічному періоді.

Матеріали дослідження. Досліджувана територія розташована у лісостеповій і степовій природних зонах України та охоплює, згідно з гідрографічним районуванням, район басейну Південного Бугу, річок Причорномор'я та суббасейн

Нижнього Дніпра [50].

Річки басейну Південного Бугу характеризуються у багаторічному розрізі вираженим весняним водопіллям і низькою меженню, яка різною мірою порушується літніми та зимовими паводками внаслідок дощів влітку і танення снігу під час відлиг. Річки Інгул, Інгулець і річки Причорноморської низовини протікають у степовій зоні, яка характеризується посушливим кліматом, несталим зимовим режимом із нестійким сніговим покривом (у зв'язку з відлигами 40% зим), що призводять до часткового або повного танення снігу і формування зимових паводків різної інтенсивності та водності. Водний режим річок лівобережжя Нижнього Дніпра характеризується достатньо вираженою весняною повінню і літньо-осінньої меженню, порушуваною дощовими паводками та відлигами. Невеликі річки Причорноморської низовини не дренують основні водоносні горизонти й тому практично не мають підземного живлення, що призводить до їх пересихання влітку або перемерзання зимою.

Комплексні графіки ходу гідрометеорологічних характеристик періоду межені для деяких річок представлені на рис. 1 та рис. 2.

Для розробки методики територіального прогнозу середньодадних витрат води меженного

стоку були прийняті дані про щоденні та середньодадні витрати води за період літнього (червень-серпень), осіннього (вересень-листопад) і зимового (грудень-січень) сезонів з 1980 р. по 2015 р. для опорних гідрологічних постів досліджуваних річок України, перелічених в табл. 1 з даних Державного водного кадастру [51]. За подальші роки вихідні дані залучено з системи Автоматизованого робочого місця гідролога [52] та офіційного сайту Українського гідрометцентру ДСНС України www.meteo.gov.ua. Вихідні дані для розробки методики прогнозу середньодадних витрат води сезонного меженного стоку річок Півдня України [53] сформовано в базі даних в Excel.

Методи дослідження. Об'єм літньо-осіннього меженного стоку (середня витрата води) за деякий проміжок часу (або період) Δt , який перевищує максимальний час добігання води τ_{max} по руслах річок можна представити рівнянням [54]

$$Q\Delta t = Q_r\Delta t + Q_d\Delta t + W_{t_0}, \quad (1)$$

де $Q\Delta t$ – меженний стік за час Δt ;

$Q_r\Delta t$ і $Q_d\Delta t$ – стік річок, обумовлений відповідно припливом підземних і дощових (поталих) вод;

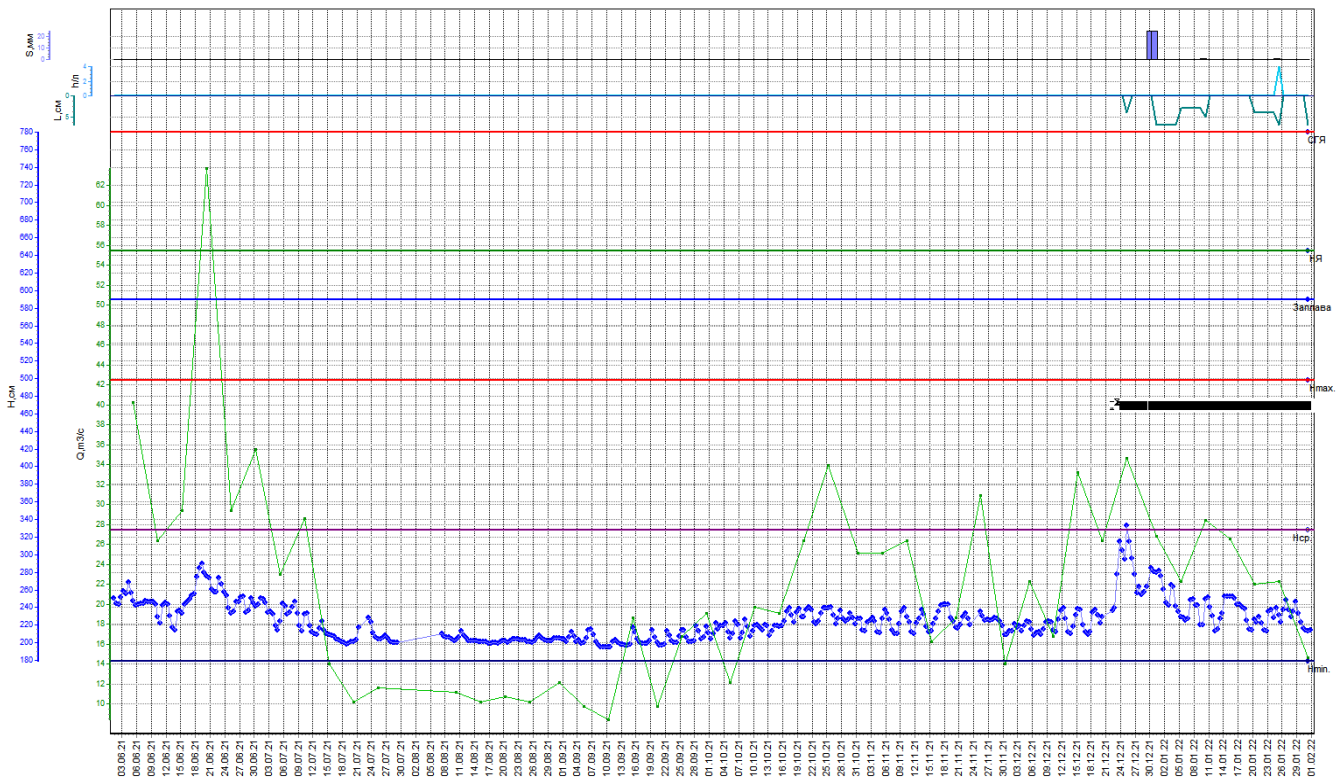


Рис. 1. Комплексний графік ходу гідрометеорологічних характеристик періоду межені р. Південний Буг – с. Підгір'я (01.06.2021-31.01.2022 рр.) /

Fig. 1. Complex graph of hydrometeorological characteristics of the low water period of the Pivdennyi Buh River – the Pidhirya water gauging station (June 1, 2021-January 31, 2022)

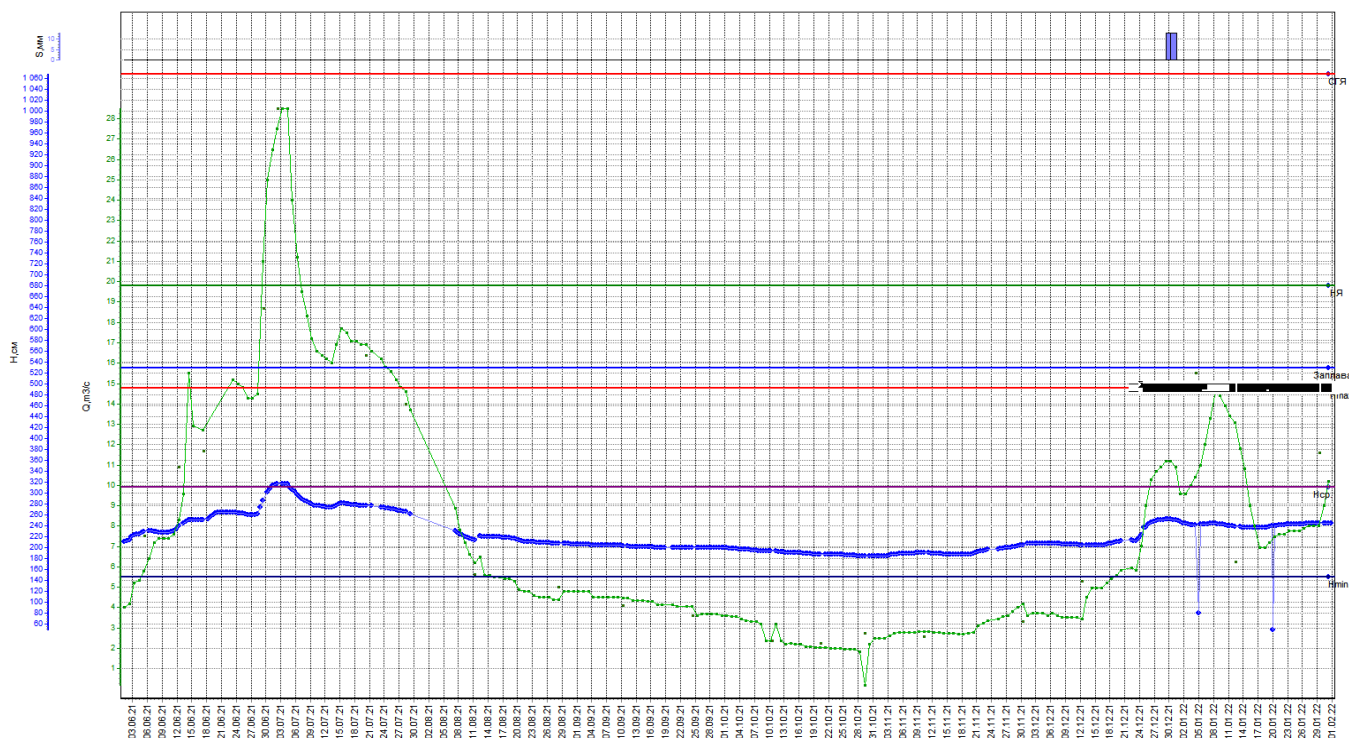


Рис. 2. Комплексний графік ходу гідрометеорологічних характеристик періоду межені р. Оріль – с. Царічанка (01.06.2021-31.01.2022 рр.)

Fig. 2. Complex graph of hydrometeorological characteristics of the low water period of the Oril River – the Tsarichanka water gauging station (June 1, 2021-January 31, 2022)

Таблиця 1 / Table 1

Перелік опорних постів для розробки регіональної методики прогнозу середньодакдних витрат води меженого літнього, осіннього і зимового стоку по гідрографічних районах України [50] / List of the base the water gauging stations for the development of the regional methodology for forecasting the average decade water discharge of the low summer, autumn, and winter flow within the hydrographic regions of Ukraine [50]

Індекс поста	Річка - пост	Площа водозбору, км ²
Район басейну р. Південний Буг (верхня та середня течії)		
81361	Південний Буг - с. Тростяничик	17400
81363	Південний Буг - с. Підгір'я	24600
81393	Рів - с. Демидівка	1130
81417	Синюха - с. Синюхін Брід	16700
81430	Велика Вись - с. Ямпіль	2820
81433	Ятрань- с. Покотилове	2140
Район басейну р. Південний Буг (нижня течія) та район річок Причорномор'я		
81414	Кодима – с. Катеринка	2390
81438	Чорний Ташлик - с. Тарасівка	2230
81450	Інгул – с. Новогорожене	6670
81338	Тилігул - с. Березівка	3170
81475	Великий Куяльник – с. Северинівка	1840
Суббасейну Нижнього Дніпра		
80473	Оріль – смт Царичанка	9100
80486	Самара – с. Кочережки	19800
80505	Вовча – смт Васильківка	11600
80513	Мокрі Яли – х. Грушівський	2660
80518	Гайчур – с. Андріївка	2100
80561	Інгулець – с. Олександро-Степанівка	4200
80568	Інгулець – м. Кривий Ріг	8600

W_{t_0} – запас води в річковій мережі в початковий момент часу t_0 .

Для періоду зимової межени за наявності зимових відлиг дощова складова ($Q_{д}\Delta t$) замінюється тало-дощовою ($Q_{ТД}\Delta t$) і рівняння має вигляд

$$Q\Delta t = Q_{г}\Delta t + Q_{ТД}\Delta t + W_{t_0}. \quad (2)$$

На сьогодні зі складових рівнянь (1) і (2) з достатньою точністю можна визначити лише запас води в річковій мережі W_{t_0} (наприклад, за гідрометричними або морфометричними даними). Ця складова має суттєве значення для великих річок з максимальним часом руслового добігання, який дорівнює або перевищує період завчасності прогнозу (наприклад, місяць). За відсутності даних для розрахунку руслових запасів води, величину W_{t_0} можна приблизно оцінити через витрату води у замикаючому створі в момент часу t_0 .

Підземну та дощову складові стоку за період завчасності прогнозу визначити значно важче ніж W_{t_0} , особливо для великих річок, де дощовий стік дуже слабо виражений. Підземне живлення, як вже говорилося, відбувається за рахунок першого від поверхні безнапірного водоносного горизонту та більш глибокого, у тому числі напірного, горизонту підземних вод, визначення яких має певні труднощі. Дощовий приплив води ($Q_{д}\Delta t$) може бути отриманий через кількість опадів, які приймають участь у формуванні стоку розглядуваного періоду.

У зв'язку з цим для прогнозів меженого стоку рівняння (1) і (2) не можуть бути використані безпосередньо. Тому в практиці гідрологічних прогнозів будуються емпіричні кореляційні залежності меженого стоку від факторів, які його визначають, зазвичай побудови графічного зв'язку між стоком або рівнем води поточного моменту часу та стоком або рівнем декілька днів тому. Залежність, отримана таким чином, може бути використана для екстраполяції на певні моменти часу в майбутньому, але при врахуванні випадіння опадів [1].

Так, для прогнозу меженого стоку (наприклад, середніх витрат води за період (або проміжок часу) Δt) зони недостатнього зволоження, якою є досліджувана територія України, при невеликій кількості опадів або малої змінності їх кількості у літньо-осінній період найбільш часто використовуються залежності вигляду [54]:

$$\bar{Q}_{t+\Delta t} = f(W_t) \quad (3)$$

або

$$\bar{Q}_{t+\Delta t} = f(Q_t), \quad (4)$$

де $\bar{Q}_{t+\Delta t}$ – середня витрата води за період часу Δt , м³/с;

W_t – запас води в річковій мережі на дату випуску прогнозу t , м³;

Q_t – витрата води у замикаючому створі річки на дату випуску прогнозу t , м³/с.

Такі прогностичні залежності, встановлюються для конкретної річки за даними багаторічних спостережень для окремих місяців літньо-осіннього і зимового періодів. Точність прогнозів при цьому буде тим вища, чим менший вплив дощів на стік меженого періоду, тобто для річок з незначною долею дощового стоку і для великих річок лісостепової та степової географічних зон [54]. При необхідності врахування поверхневого дощового стоку в прогнозах середньодекадних витрат води головні труднощі полягають не тільки в складності розрахунку дощового стоку, а й обмежених можливостей прогнозу опадів з великою завчасністю.

Ще в 1939 році в ДГІ (в [32]), в основу розробки територіальних прогнозів літнього та осіннього стоку був покладений метод років-аналогів, вибір якого виконувався по величині весняного стоку й по сумі опадів за місяць, які своєю чергою бралися по прогнозу погоди.

Дослідженням статистичної структури часових рядів середніх векторів узагальнених кластерів атмосферних опадів у різні сезони року присвячені публікації авторів Л. Д. Гончарової та О. М. Прокоф'єва [55, 56]. Ними виконана кластеризація місячної кількості опадів у сезони року для всієї території України з карто-схемою цього районування, яка показала, що південні регіони України формують кластери, що відповідають закономірностям розподілу опадів над територією.

Для періоду зимової межени необхідно врахувати надходження до руслової мережі тало-дощових вод періоду зимових відлиг, що у прогнозному варіанті виконати доволі складно.

Виклад основного матеріалу дослідження.

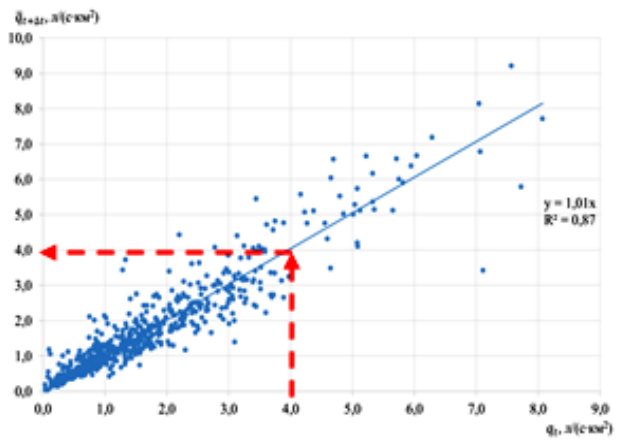
Задача територіального прогнозу літнього, осіннього та зимового стоку досліджуваних річок України вирішена в даній роботі на основі рішення рівнянь (1) чи (2) у вигляді залежностей типу (4) для низки опорних постів згідно табл. 1.

При цьому, регіональні прогностичні залежності побудовані для модулів стоку, тобто у вигляді – $q_{t+10} = f(q_t)$ окремо для кожного місяця за літній (червень-серпень), осінній (вересень-листопад) та зимовий (грудень-січень) періоди (за базовий період 1980-2015 рр.). За дату t , на яку визначаються величина q_t , тобто дату складання прогнозу декадного стоку, приймається 10, 20-ге, чи 30(31) - те число кожного місяця. Період або проміжок часу Δt для річок розглядуваного регіону прийнятий за одну декаду.

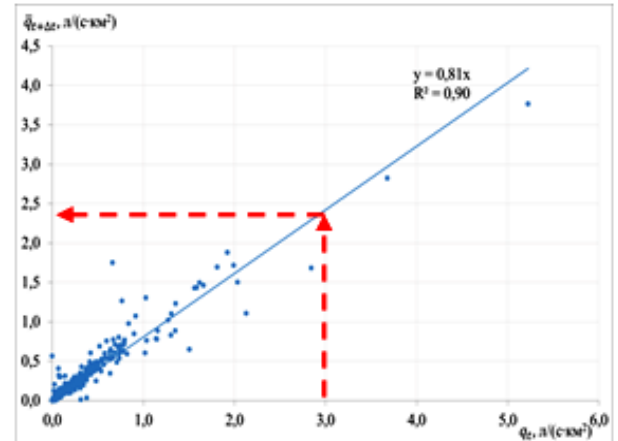
Обґрунтування регіональних залежностей і узагальнення параметрів територіальної методики короткострокових прогнозів середньодадних модулів стоку меженного періоду в межах басейнів рр. Південний Буг, Причорномор'я та Нижнього Дніпра велось з урахуванням результатів кластеризації місячної кількості атмосферних опадів на території України у зимовий, літній,

осінній сезони [55]. Приклади регіональних залежностей для територіальних короткострокових прогнозів середньодадних модулів меженного стоку в басейнах зазначених річок наведені на рис.3 а, б, а схема випуску прогнозу середньодадних модулів стоку меженного періоду – червоним пунктиром (рис.3 а,б).

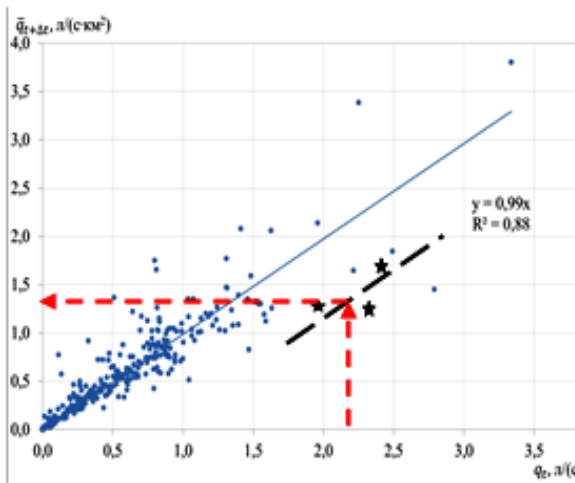
Точність залежностей для територіальних



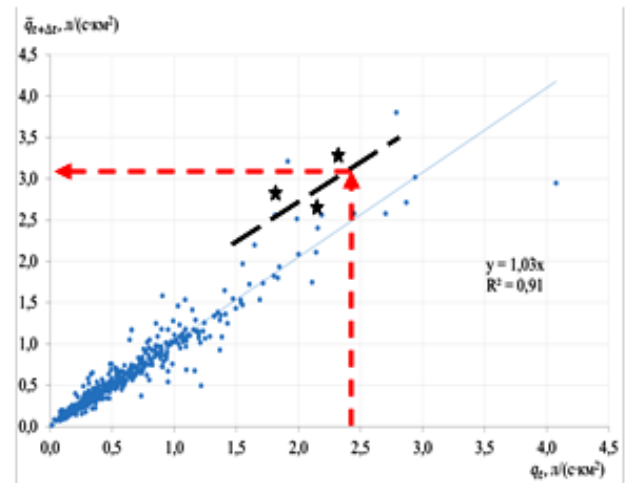
а) в басейні р. Південний Буг (для червня) /
a) in the basin of the Pivdennyi Buh river (for June)



б) в басейні лівобережжя Нижнього Дніпра
(для серпня) /
b) in the basin of the left bank of the
Lower Dnipro (for August)



в) в басейнах річок Причорномор'я
(для вересня) /
c) in the Black Sea river basins (for September)



г) в басейні лівобережжя Нижнього Дніпра
(для грудня) /
d) in the basin of the left bank of the
Lower Dnipro (for December)

Рис. 3. Регіональні залежності для територіальних короткострокових прогнозів середньодадних модулів меженного стоку (1980-2015 рр.) /

Fig. 3. Regional dependencies for the territorial short-term forecasts of the average decade modules of low flow (1980-2015)

прогнозів літнього, осіннього та зимового стоку обумовлена варіацією атмосферних опадів осіннього сезону, які можуть враховуватися за кількістю опадів у періоди випуску прогнозу стоку та метеорологічним прогнозом опадів на поточну декаду. При цьому для зимової межени форму-

вання низьких витрат води більшою мірою пов'язане з наявністю зимових відлиг і формуванням паводків, що є характерним для річок розглядуваної території.

Однак, слід зазначити, що для басейну Нижнього Дніпра у зв'язку зі значною зарегульованіс-

тю р. Інгулець розробка методики територіального короткострокового прогнозу середньодадних витрат води меженного періоду велася окремо для басейну цієї річки. Так, на річці існує каскад Інгулецьких водосховищ, який включає Войнівське, Іскрівське, Карачунівське водосховища. Верхня ділянка річки зарегульована греблями Карачунівського (3600 га) та Іскрівського водосховищ. Крім того, є дамба ГЕС у смт Велика Олександрівка, а також греблі біля сіл Могилівка, Заградівка та Мала Олександрівка. Такі гідротехнічні споруди порушують режим меженного стоку, особливо, як виявилось по точності прогностичних залежностей, в літній період у зв'язку з можливими скидами води з водосховищ.

Оцінка методики короткострокових прогнозів меженного стоку річок. За критерій якості методики короткострокових прогнозів меженного стоку річок прийняте відношення середньої квадратичної похибки перевірних прогнозів S до середнього квадратичного відхилення σ_{Δ} й забезпеченості допустимої похибки $P\%$ [57]. В цілому методика територіальних короткострокових прогнозів середньодадних витрат води меженного літнього, осіннього та зимового стоку досліджуваних річок України оцінюється як задовільна – інтервал критерію якості та ефективності методики S/σ_{Δ} становить 0,53 – 0,87, а забезпеченість допустимої похибки доволі висока – $P\%$ змінюється від 70 % до 97%, при числі членів ряду понад 500 точок.

Висока забезпеченість $P\%$ при критерії якості методики на рівні задовільних оцінок свідчить про те, що окремі значні похибки виникають при випадінні стокоформуєчих опадів, особливо восени, які формують паводки на річках і порушують режим межені. Як вже відмічалось раніше, таких похибок можна уникнути або скоротити якщо кількість опадів періоду завчасності прогнозу враховувати за метеорологічним прогнозом опадів. Для зимових місяців значну роль у виникненні похибок прогнозів відіграє наявність зимових відлиг, таненні снігу і формування паводків, а в останні роки й випадіння рідких опадів в цей період. Уточнення прогнозів досягається й при поточному їх коректуванні шляхом урахування попередніх вихідних даних методики та похибок, які виникали при випуску прогнозу в ці дати – при кількості опадів періоду завчасності прогнозу нижче за кліматичну норму (рис. 3в, чорний пункт) або вище за неї (рис.3 г, чорний пункт).

Методика визначення ймовірнісних характеристик прогнозних величин меженного стоку річок. Інформація про повторюваність низького стоку може бути отримана з аналізу, що належить до ймовірності перевищення параметрів гідрологічного явища [1].

У ймовірнісно-прогностичному методі територіальних короткострокових прогнозів величин меженного стоку досліджуваних річок України пропонується, аналогічно максимального стоку весняного водопілля [29,30], встановлення забезпеченості або ймовірності перевищення (ймовірності настання) прогнозних величин у багаторічному періоді ($P\%$), що є особливо важливим для річок, не вивчених у гідрологічному відношенні.

За наявності багаторічних рядів стокових спостережень задача встановлення ймовірності перевищення у багаторічному розрізі прогнозних величин ($P\%$) вирішується шляхом побудови емпіричних кривих забезпеченості середніх витрат води меженного періоду $q_{сер} = f(P\%)$ [58]. У прогностичній моделі $q_{сер}$ встановлюються по регіональних прогностичних залежностях вигляду (4).

Для визначення забезпеченості прогнозних величин середньодадних витрат води літньої, осінньої та зимової межені в роботі встановлений емпіричний розподіл середньомісячних витрат води в зазначені сезони межені (за період 1980-2015 рр.), що узагальнені в басейнах досліджуваних річок України, відповідно табл. 1 (рис. 4, рис. 5). З графіків емпіричного розподілу, для кожної прогнозної величини середньодадних витрат води знімаються їх забезпеченості настання у багаторічному періоді $P\%$ (червоний пункт).

Слід відмітити, що характер емпіричного розподілу середньомісячних витрат води всіх сезонів межені річок нижньої течії Південного Бугу та річок Причорномор'я (рис.5) вказує на те, що вже при забезпеченості низьких витрат води на рівні 50-55 % невеликі річки території пересихають чи перемерзають.

Картографічне представлення прогнозних модулів літнього, осіннього та зимового меженного стоку річок та їх ймовірнісних характеристик. В гідрологічній практиці для наявного представлення прогнозних величин у просторовому розподілі будують карти зміни цих величин по території. Це може відноситися й до прогнозних величин витрат води у меженний період. Такий підхід був запропонований ще у 1939 р. в методиці ДГІ територіального прогнозування меженного стоку (в [32]) (у модульних коефіцієнтах) для достатньо великої території, що дозволила б встановити очікувану величину літнього стоку за даний місяць практично для кожної річки території.

В ймовірнісно-прогностичному методі територіальних короткострокових прогнозів величин меженного стоку річок Півдня України пропонується для оцінки розмірів очікуваної межені у кожному році, представляти прогнозні величини витрат води на підставі карто-схем модулів

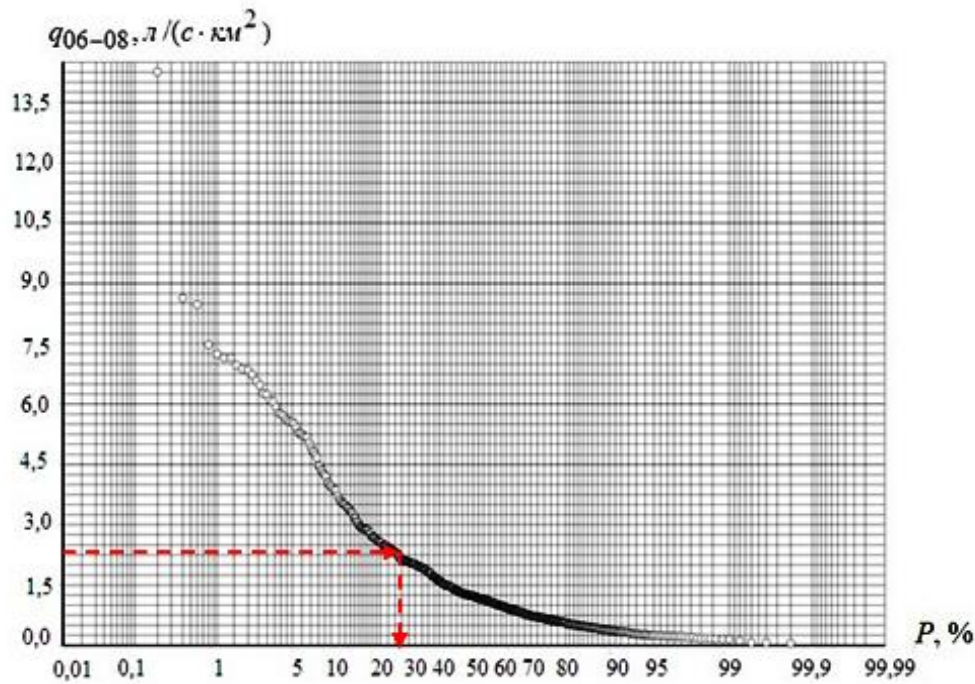


Рис. 4. Емпіричний розподіл середньомісячних витрат води періоду літньої межени річок в басейні р. Південний Буг (за період 1980-2015 рр.) /
 Fig. 4. Empirical distribution of average monthly water discharges during the summer low flow period in the Pivdennyi Buh river basin (1980-2015)

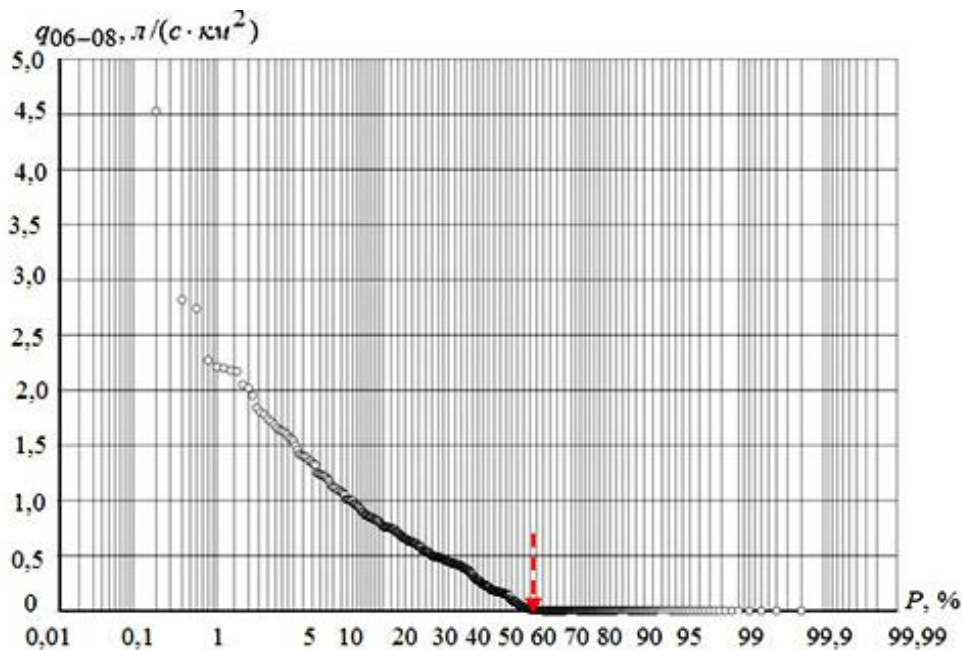


Рис. 5. Емпіричний розподіл середньомісячних витрат води періоду літньої межени річок в басейні нижньої течії Південного Бугу та річок Причорномор'я (за період 1980-2015 рр.) /
 Fig. 5. Empirical distribution of average monthly water discharges during the summer low flow period in the basin of the lower stream of the Pivdennyi Buh and Black Sea Area Rivers (1980-2015)

меженного стоку \bar{q}'_{t+10} , л/(с·км²). Одночасно з карто-схемами прогнозних значень модулів стоку меженного періоду надається й карта ймовірності перевищення прогнозних величин у багаторічному розрізі (P %) у будь-якій частині території,

незалежно від стану її гідрометеорологічної вивченості. Приклади таких карто-схем прогнозних величин модулів літнього меженного стоку та його ймовірнісних характеристик в басейнах річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра представлено на рис. 6 і рис. 7.

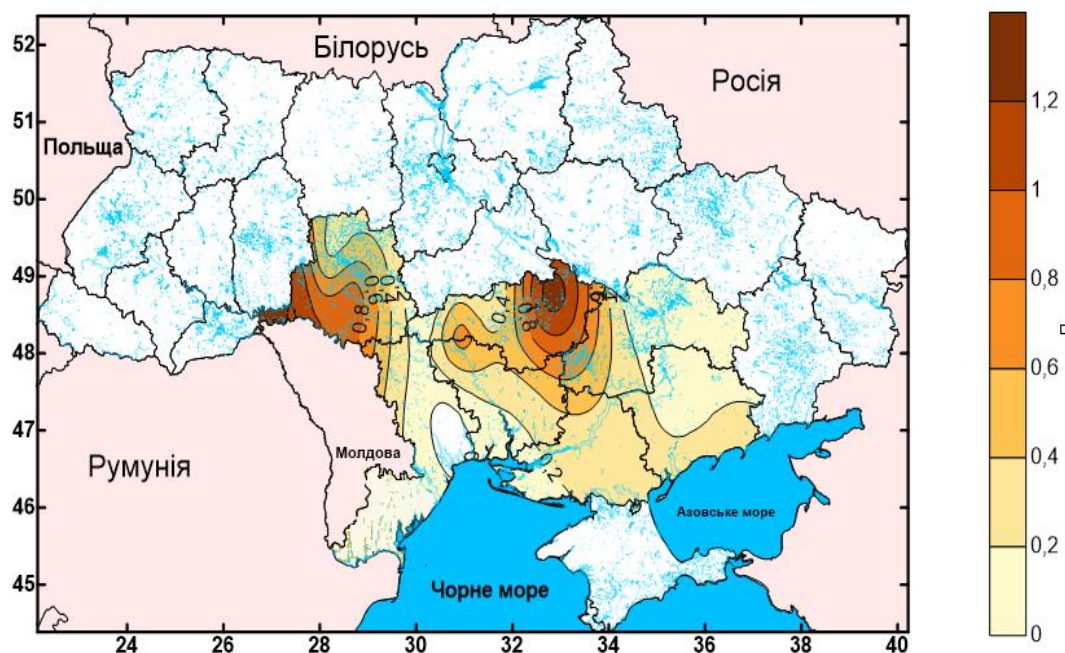


Рис. 6. Карто-схема прогнозних величин середньодакдних модулів стоку періоду літньої межени (3 декада липня) 2019 р. в басейнах річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра / Fig. 6. Map scheme of forecast values of average decade water runoff modules during the summer low flow period (3rd decade of July) in 2019 in the basins of the Pivdennyi Buh, Black Sea area, and Lower Dniro rivers

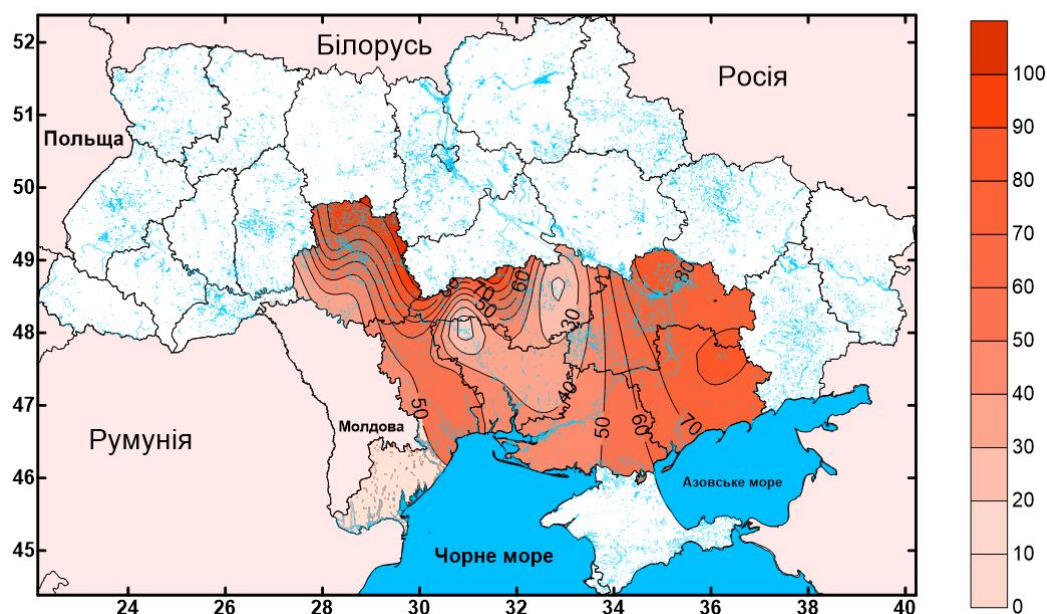


Рис. 7. Карто-схема прогнозних забезпеченостей середньодакдних витрат води періоду літньої межени (3 декада липня) 2019 р. в басейнах річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра / Fig. 7. Map scheme of the forecasted probability of average decade water discharge during the summer low flow period (3rd decade of July) in 2019 in the basins of the Pivdennyi Buh, Black Sea area, and Lower Dniro rivers

Використання таких карто-схем прогнозних модульних коефіцієнтів межених витрат води дозволяє здійснити просторовий моніторинг водності річок межениго періоду та виконати прогноз середньодакдних витрат води на досліджуваних річках України, причому й на річках, на яких не ведуться спостереження за стоком води.

Карто-схеми прогнозних забезпеченостей середньодакдних витрат води періоду межени дають змогу ймовірнісних характеристик стоку їх настання у багаторічному періоді (рис. 7).

Так, за цими карто-схемами можливо надавати оцінку виникнення низького стоку річок території, наприклад при досягненні його значень

близьких до екологічних витрат води, які є критичним показником для функціонування такими екосистеми річки. Оцінка за ним проводиться при утриманні маловоддя (за основними критеріями) упродовж 1 місяця і більше. Значення екологічної витрати води є сталим розрахованим показником для кожного гідрологічного поста на річках [25].

Висновки. В роботі обґрунтовано ймовірно-прогностичний метод для прогнозування меженних витрат води (літнього, осіннього та зимового періодів) на основі побудови регіональних залежностей середньодекадних модулів стоку від попередніх витрат води для груп басейнів річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра з урахуванням кліматичних закономірностей розподілу опадів територією та встановлення ймовірнісних характеристик меженних витрат води у багаторічному періоді.

В цілому методика територіальних короткострокових прогнозів середньодекадних витрат води меженного літнього, осіннього та зимового стоку досліджуваних річок України оцінюється як задовільна при забезпеченості допустимої похибки від 70 % до 97 %, при числі членів ряду понад 500 точок.

Запропонована методика територіальних прогнозів меженного літнього, осіннього та зимового стоку досліджуваних річок України дозволяє за встановленими регіональними залежностями випускати прогнози середніх за декаду витрат води для будь-якої річки території, не залежно від наявності регулярних спостережень за стоком

води. Точність прогнозів середньодекадних витрат води літнього та осіннього меженних періодів буде визначатися варіацією кількості опадів з врахуванням метеорологічного прогнозу опадів, а для зимового періоду – прогнозом температури повітря і можливим таненням снігу у періоди зимових відлиг.

Для визначення забезпеченості прогнозних величин середньодекадних витрат води літньої, осінньої та зимової межени встановлений емпіричний розподіл середньомісячних витрат води в сезони межени, що узагальнені в басейнах досліджуваних річок України.

Для оцінки розмірів очікуваної межени у кожному році прогнозні величини витрат води одержуються за карто-схемами модулів меженного стоку, а також їх ймовірнісних величин. Використання таких карто-схем дозволяє здійснити просторовий моніторинг та оцінити ступінь маловоддя на річках в цілому для всього досліджуваного регіону України, включаючи й ті річки, по яких спостереження за стоком відсутні, а їх ймовірнісні характеристики – надавати оцінку можливого виникнення низького стоку.

Перспективами подальших досліджень є використання прогностично-ймовірнісного методу для завчасного визначення меженних витрат води та їх ймовірності настання у багаторічному періоді, що є особливо важливим при досягненні прогнозних значень витрат води близьких до екологічних, які є критичним показником для функціонування екосистеми річки.

Список використаної літератури

1. *Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения [Текст]. – Пятое изд. – ВМО-№ 168., 1997. – 843 с.*
2. *Руководство по гидрологической практике. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов [Текст]. – Том II. Шестое издание. – ВМО-№ 168., 2012. – 324 с.*
3. *Загальна гідрологія [Текст] : підручник / за ред. В.К. Хільчевського, О.Г. Ободовського. – К.: ІПЦ «Київ. ун-т», 2008. – 399 с.*
4. *Горбачова, Л.О. Гідрологія [Текст]: навчальний посібник для вищих навчальних закладів / Л.О. Горбачова. – К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2010. – 125 с.*
5. *Юценко, Ю.С. Загальна гідрологія [Текст]: підручник / Ю.С. Юценко. – Ч.: Чернівецький нац.ун-т, 2017. – 591 с.*
6. *The challenges of climate change [Текст] : The outcomes of IPCC WGI (Assesment Report) / Co-Chair IPCC Working Group I : рук. Thomas Stocher. – University of Bern, Switzerland, 2013.*
7. *Лялько, В.І. Використання даних наземного та космічного моніторингу для аналізу сучасних змін клімату в Україні [Текст] / В.І. Лялько, Л.О. Єлістратова, О.А. Апостолов // Український журнал дистанційного зондування Землі. - 2014. – № 1. – С. 20-24. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukjdz_20141_7*
8. *Писаренко, В.М., Посухи в контексті змін клімату України [Текст] / В.М. Писаренко, П.В. Писаренко, В.В. Писаренко, О.О. Горб, Т.О. Чайка // Вісник ПДАА. – 2019. – № 1. – С. 134-146. <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.01.18>*
9. *Мартазинова, В.Ф. Характер екстремальних опадів початку ХХІ століття на території України [Текст] / В.Ф. Мартазинова, А.А. Щеглов // Український гідрометеорологічний журнал. – 2018. – № 22. – С. 36-45. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04>*
10. *Савчук, С.В. Районування України по впливу екстремальних значень максимальної температури повітря у теплий та холодний періоди року [Текст] / С.В. Савчук, Н.М. Ювченко, В.Є. Тимофеев // Український гідрометеорологічний журнал. – 2018. – № 22. – С. 46-56. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.05>.*

11. Хохлов, В.М. Вплив змін клімату на періоди холодної погоди в Україні [Текст] / В.М. Хохлов, К.С. Сіріченко, О.В. Уманська // Вісник Одеського державного екологічного університету. – 2017. – № 22. – С. 39-44. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodeu_2017_22_7
12. Водні ресурси України у зв'язку з кліматичними умовами. Україна: географічні проблеми сталого розвитку [Текст] : збірник наукових праць дев'ятого з'їзду Українського географічного товариства / редкол. : Н.С. Лобода, Є.Д. Гонченко. – К.: ВГЛ Обрії., 2004. – Т. 3. – С. 144-146.
13. Лобода, Н.С. Влияние изменений климата на водные ресурсы Украины (моделирование и прогнозы по данным климатических сценариев) [Текст] / Н.С. Лобода // Глобальне и региональные изменения климата. – 2011. – С. 340-351. <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/3771>
14. Лобода, Н.С. Вплив змін клімату на водні ресурси України у сучасних та майбутніх умовах (за сценарієм глобального потепління А1В) [Текст] / Н.С. Лобода, З.Ф. Сербова, Ю.В. Божок // Український гідрометеорологічний журнал. – 2014. – №15. – С. 149-159. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uggj_2014_15_23
15. Гребінь, В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз) [Текст] / В.В. Гребінь. – К.: Ніка-Центр, 2010. – 316 с.
16. Рахматуліна, Е.Р. Майбутні тенденції змін характеристик гідрологічного режиму річок басейну, Південного Бугу в зимовий період [Текст] / Е.Р. Рахматуліна, В.В. Гребінь // Український гідрометеорологічний журнал. – 2017. – № 20. – С. 91-98. <https://doi.org/10.31481/uhmj.20.2017.11>
17. Grebin, V. Forecasting the runoff on rivers of the Dniester river basin according to the REMO numeric climatic model [Текст] / V. Grebin, K. Mudra // World science. – 2018. – № 9(37). – Pp. 26-32. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092018/6131
18. Горбачова, Л.О. Оцінка можливих майбутніх змін водного стоку річок України (на середину XXI століття) [Текст] / Л.О. Горбачова // Проблеми матеріальної культури. Географічні науки. – 2014. – С. 89-94. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/92902>
19. Ovcharuk, V. Engineer substantiation of estimated characteristics of maximum rivers runoff during floods under climate change : Ecological Significance of River Ecosystems. Chapter 18 [Текст] / V. Ovcharuk, E. Gopchenko; editor(s): Sughosh Madhav, Shyam Kanhaiya, Arun Srivastav, Virendra Singh, Pardeep Singh. – Elsevier, 2022. – Pages 351-382. – ISBN 9780323850452. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00018-2>
20. Ботьбот, Г.В. Оцінка багаторічних коливань мінімальних витрат води річок басейну Сіверського Дінця [Текст] / Г.В. Ботьбот // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2019. – № 3 (54). – С. 31-33. http://nbuv.gov.ua/UJRN/glhge_2019_3_12
21. Reshetchenko, S. Climate indicators of changes in hydrological characteristics (a case of the Psyol river basin) [Текст] / S. Reshetchenko, S. Dmitriiiev, N. Cherkashyna, L. Goncharova // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія». – 2020. – Вип. 53. – С. 176-189. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-12>
22. Горбачова, Л.О. Сучасний внутрішньорічний розподіл водного стоку річок України [Текст] / Л.О. Горбачова // Український географічний журнал. – 2015. – №3. – С. 16-23. <https://doi.org/10.15407/ugz2015.03.016>
23. Семенова, І.Г. Прогностичний розподіл посух теплого сезону по території України в 2021-2050 рр. [Текст] / І.Г. Семенова, А.М. Польовий // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія». – 2020. – Вип. 53. – С. 190-200. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-13>
24. Tallaksen, L.M. Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater [Текст] / L.M. Tallaksen, Van Lanen, Henny. – 2004. – 579 p.
25. Овчарук, В.А. Мінімальний та екологічний стік річок в зоні недостатньої водності України [Текст] / В.А. Овчарук, Л.В. Куценко, О.М. Прокоф'єв, М.В. Гонцій, Г.М. Андреевська // Екологічні науки. – 2021. – Вип. 2 (35). – С. 30-36. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.5>
26. Куценко, Л.В. Дослідження дефіцитів водності та індексів посухи для зони недостатньої водності України [Текст] / Л.В. Куценко // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2021. – Вип. 4 (62). – С.34-46. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.4.3>
27. Tabari, H. Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI) [Текст] / H. Tabari, J. Nikbakht, T.P. Hosseinzadeh // Water Resources Management. – 2013. – 27 (1). – Pp. 137-151. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0173-3>
28. Кочелаба, Е.И. Математическое моделирование процессов формирования половодного стока на территории Полесья с учетом отпелельных явлений [Текст] / Е.И. Кочелаба, В.П. Окорский, М.Н. Соседко // Труды УкрНИГМИ. – 1990. – Вып. 235. – С. 3-18.
29. Шакирзанова, Ж.Р. Довгострокове прогнозування характеристик весняного водопілля в басейні р. Південний Буг [Текст]: монограф. / Ж.Р. Шакирзанова, А.О. Докус. – О.: ФОП Бондаренко М.О., 2021. – 244 с. – ISBN 978-617-8005-42-9.
30. Shakirzanova, Z. Territorial long-term forecasting of hydrological characteristics of spring floods of lowland rivers : Ecological Significance of River Ecosystems. Chapter 17 [Текст] / Z. Shakirzanova, A. Dokus; editor(s): Sughosh Madhav, Shyam Kanhaiya, Arun Srivastav, Virendra Singh, Pardeep Singh. – Elsevier, 2022. – Pp. 325-350. – ISBN 9780323850452. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00020-0>
31. Попов, Е.Г. Гидрологические прогнозы [Текст] / Е.Г. Попов. – Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1958. – 386 с.

32. Аполлов, Б.А. Гидрологические прогнозы [Текст] / Б.А. Аполлов, Г.П. Калинин, В.Д. Комаров. – Л.: ГИМИЗ, 1960. – 410 с.
33. Bodwell, V.J. Regression analysis of non-linear catchment systems [Текст] / V.J. Bodwell // *Water Resources Research*. – 1971. – Vol. 7. – Pp. 1118–1125. https://doi.org/10.1029/WR007i005p_01118
34. Wright, C.E. Monthly Catchment Regression Models: Thames Basin [Текст] / C.E. Wright // *Central Water Planning Unit, Technical*, 1975. – No. 8. – Pp. 32.
35. *Proceedings of the International Symposium on Flash Floods – Measurements and Warning [Текст]* : International Association of Hydrological Sciences. – Paris, 9–12 September. 1974. – Publication No. 112.
36. Report № 34. Operational Hydrology [Текст]: Hydrological Models for Water-Resources System Design and Operation / World Meteorological Organization – Geneva, 1990. – No. 740. https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=8846#.YpPUA0pBzIU
37. *A Generalized Streamflow Simulation System : Conceptual Modelling for Digital Computers [Текст]* : National Weather Service and State of California Department of Water Resources / редкол : R.J.C. Burnash, R.L. Ferral, R.A. McGuire. – March, 1973. – P. 69.
38. Gerlinger, K., Demuth, N. The flood forecast model LARSIM: application experiences and evaluation of operational runoff forecasts in the Moselle basin [Текст] / in: Boeckx, L. (Ed.) *International Symposium on Innovations in Flood Forecasting Systems, 16-17 March 2011, Flanders Hydraulics Research Antwerp, Belgium: book of abstracts*. pp. 7-8. <https://www.vliz.be/en/imis?module=ref&refid=205639>
39. Abbott, M.B. An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen [Текст] / M.B. Abbott, J.C. Bathurst, J.A. Cunge et al. // "SHE," 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*. – 1986. – No. 87. – Pp. 61-77. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)
40. Wigmosta, M.S. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain [Текст] / M.S. Wigmosta, L. Vail, D.P. Lettenmaier // *Water Resources Research*. – 1994. – Vol. 30. – Pp. 1665-1679.
41. Wilke, K. Operationelle Wasserstands – und Durchflussvorhersagen im Rheingebiet. Operational forecast of water level and runoff in Rhine Catchment [Текст] / K. Wilke, S. Rademacher // *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*. – 2002. – No. 54. – Pp. 9-10.
42. Reichel, G. FluxDSS und FLORIS2000 – ein leistungsfähiges Paket zur Modellierung der Fließvorgänge in komplexen Systemen [Текст] / G. Reichel // *Österreichische Wasserwirtschaft*. – 2001. – 53. – Pp. 5-6.
43. Calibration techniques used for HBV hydrological model in Savinja catchment [Текст] : conference abstracts XXIVth of the Danubian countries on hydrological forecasting and hydrological bases of water management, 2-4 June 2008 / редкол : Kobold M., Suselj K., Polajnar J. et al. – Slovenia, 2008. – Pp. 14.
44. User guide. MIKE 11. A Modelling System for River and Channels [Текст] . – DHI, 2012. – Vol.2. – 204 p.
45. Hydrological calibration scenarios of the HSPF model for the upper Iskar basin [Текст] : conference abstracts XXIII of the Danubian countries on hydrological forecasting and hydrological bases of water management, 28-31 August 2006 / редкол : Ninov P., Ribarova I., Nikolaidis N. at al. Belgrade, Serbia, 2006. – Pp. 59.
46. Parey, S. Extreme Low Flow Estimation under Climate Change [Текст] / S. Parey, J. Gailhard // *Atmosphere*. – 2022. – 13. – 164. <https://doi.org/10.3390/atmos13020164>
47. Христюк, Б.Ф. Краткосрочное прогнозирование уровней воды в Килийском рукаве Дуная [Текст] / Б.Ф. Христюк // *Energetika*. – 2014. – Т. 60. № 1. – С. 69-75. <https://doi.org/10.6001/energetika.v60i1.2874>
48. On use of drought indexes in modeling hydrological processes [Текст] : Geoconference on Water Resources: Hydrology and Water Resources, 17–26 June 2014 / редкол : Semenova I., Ovcharuk V., Shakhirzanova J. – Albena, 2014. – 1. – Pp. 503–510. https://doi.org/10.5593/SGEM_2014/B31/S12.065
49. Ovcharuk, V. Extreme hydrological phenomena in the forest steppe and steppe zones of Ukraine under the climate change [Текст] / V. Ovcharuk, E. Gopchenko, N. Kichuk, Z. Shakhirzanova, L. Kushchenko, M. Myroschnichenko // *Proc. IAHS*. – 2020. – 383. – Pp. 229–235. <https://doi.org/10.5194/piahs-383-229-2020>
50. Методики гідрографічного та водогосподарського районування території України відповідно до вимог Водної Рамкової Директиви Європейського Союзу [Текст]. – К. : Інтерпрес ЛТД, 2013. – 55 с.
51. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2011-2015 рр. та весь період спостережень) [Текст]. Ч. 1. Річки. Вип. 1. Басейни Західного Бугу, Дунаю, Дністра, Південного Бугу: довідкове видання. – К., 2017. – 465 с.
52. Бойко, В.М. Використання геоінформаційних технологій в оперативній гідрометеорології [Текст] / В.М. Бойко, М.І. Кульбіда, Т.І. Адаменко // *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія*. – 2010. – Вип.18. – С.25-30.
53. Методика прогнозування сезонного меженного стоку річок Півдня України для забезпечення сталого водокористування [Текст] : тез. доп. другого Всеукраїнського гідрометеорологічного з'їзду / Шакірманова Ж. Р., Погорелова М.П., Мостій А.С., Блага А.О., Стратійчук О.В. – Одеса: ОДЕКУ, 2021. – С.109-110.
54. Шакірманова, Ж.Р. Довгострокові гідрологічні прогнози : конспект лекцій [Текст] / Ж.Р. Шакірманова. – О.: Вид-во ТЕС, 2010. – 154 с.
55. Прокоф'єв, О.М. Клімато-географічні особливості розподілу опадів на території України в осінній період [Текст] / О.М. Прокоф'єв, Л.Д. Гончарова // *Екологічні науки*. – 2021. – № 2 (35). – С. 94-98. <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/9156>
56. Гончарова, Л.Д. Вплив атмосферних макропроцесів на просторовий розподіл опадів по території України у весняний сезон [Текст] / Л.Д. Гончарова, О.М. Прокоф'єв, С.І. Решетченко, А.В. Черниченко // *Український гідрометеорологічний журнал*. – 2021. – № 27. – С. 5-15.

57. Керівний документ. Оцінювання якості методики та точності (справджуваності) прогнозів режиму поверхневих вод суші [Текст]. – К. : Український гідрометеорологічний центр, 2015. – 70 с.
58. Пособие по определению расчетных гидрологических характеристик [Текст]. – Л. : Гидрометеоиздат, 1984. – 447 с.

Внесок авторів: Шакірзанова Ж. – постановка та шляхи вирішення проблеми, аналіз результатів, текст статті; Овчарук В. – аналіз останніх досліджень і публікацій, аналіз результатів; Докус А. – аналіз закордонних моделей прогнозування стоку річок, оцінка методики прогнозу; Кущенко Л. – збір вихідних даних, побудова регіональних прогнозних залежностей, побудова карто-схем прогнозних модулів меженного стоку річок та їх ймовірнісних характеристик; Тимко О. – встановлення емпіричного розподілу середньомісячних витрат води в сезони межени, побудова карто-схем прогнозних модулів меженного стоку річок та їх ймовірнісних характеристик

Probabilistic-forecasting method for determination of low flow discharge of Pivdennyi Buh, Black Sea area, and Lower Dnieper rivers

Zhannetta Shakirzanova¹,

DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Land Hydrology,
¹Odessa State Environmental University, 15 Lvivska Str., Odessa, 65016, Ukraine;

Valeriya Ovcharuk¹,

DSc (Geography), Professor, Director of the Educational and Scientific Hydrometeorological Institute;

Anhelina Dokus¹,

PhD (Geography), Senior Lecturer, Department of Land Hydrology;

Liliia Kushchenko¹,

PhD Student in the Department of Land Hydrology;

Olena Tymko¹,

PhD Student in the Department of Land Hydrology

ABSTRACT

The aim of the study is to substantiate the probabilistic-forecasting method for forecasting the low flow discharge and its implementation for the Pivdennyi Buh, Black Sea area and Lower Dnieper rivers, taking into account climatic patterns of precipitation distribution and establishing probabilistic characteristics of low flow discharge in multi-year period. The study area is in a zone of significant risk due to the shortage of water resources, the formation of extremely low runoff in the dry flow period, which requires its definition and forecasting.

The methodological basis of forecasts is to solve the equation in determining the components of the low flow of rivers by constructing regional dependences for forecasting the average decade summer-autumn low flow from previous water discharge (in runoff modules), establishing their probabilities water discharge for a number of intakes.

Results. The paper substantiates the probabilistic-forecasting method for forecasting low flow discharge (in summer, autumn and winter periods) based on the construction of regional dependences of average decadal runoff modules on previous water discharge for groups of basins of studied rivers taking into account climatic dependences of precipitation distribution in the territory and the establishment of probabilistic characteristics of the low flow water discharge in a multi-year period. The methodology of territorial short-term forecasts of average decade water discharge of low flow of summer, autumn and winter river runoff is assessed as satisfactory with a margin of error of 70 % to 97 %, with a number of members of more than 500 points. To determine the cumulative probability of the forecast values of the average decade water discharge of the summer, autumn and winter dry weather flow, the empirical distribution of the average monthly water discharge in the limited seasons, which are generalized in the basins of the studied rivers of Ukraine, is established.

Scientific novelty. For the first time for the zone of insufficient natural water content of rivers the method of territorial forecasts of low flow discharge, determination of their probability of occurrence in a multi-year period and cartographic representation of prognostic values have been developed and practically implemented.

The practical importance is the use of forecast modules maps of low flow for spatial monitoring and assessment of low water levels on rivers in the whole region, including ungauged rivers, and their probabilistic characteristics – to assess the possible occurrence of low runoff, even when it reaches values close to the environmental runoff, which are critical for the functioning of the river ecosystem.

Keywords: low flow discharge, territorial forecast, probabilistic characteristics, cartographic form of forecast.

References

1. WMO. (1997). *Guide to hydrological practice. Data collection and processing, analysis, forecasting and other applications* (5, 843).
2. WMO. (2012). *Guide to hydrological practice. Water resources management and practice of application of hydrological methods* (6(2), 324). Available at: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=14371#_YpN710pBzIU

3. Khilchevsky, V.K., Obodovsky, O.G. (Eds.). (2008). *General hydrology: a textbook*. Kyiv: CPI "Kyiv. un-t. Available at: https://uhe.gov.ua/sites/default/files/2018-07/REP000_0672.PDF
4. Gorbacheva, L.O. (2010). *Hydrology: a textbook for higher education*. Kyiv: NPU Publishing House Dragomanova.
5. Yushchenko, Yu.S. (2017). *General hydrology: a textbook*. Chernivtsi: Chernivtsi National University. Available at: <http://odnb.odessa.ua/vnn/book/2832>
6. Thomas Stocher (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*. University of Bern, Switzerland.
7. Lyalko, V.I., Elistratova, L.O., Apostolov, O.A. (2014). Using terrestrial and space monitoring data to analyze current climate change in Ukraine. *Ukrainian Journal of Remote Sensing of the Earth*, 1, 20-24. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ukjdzz_2014_1_7
8. Pisarenko, V.M., Pisarenko, P.V., Pisarenko, V.V., Gorb, O.O., Chaika, T.O. (2019). Droughts in the context of climate change in Ukraine. *Bulletin of the PDAA*, 1, 134-146. Available at: <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.01.18>
9. Martazinova, V.F., Shcheglov, A.A. (2018). The nature of extreme precipitation at the beginning of the XXI century in Ukraine. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 22, 36-45. Available at: <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04>
10. Savchuk, S.V., Yuvchenko, N.M., Timofeev, V.E. (2018). Zoning of Ukraine on the influence of extreme values of maximum air temperature in warm and cold periods of the year. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 22, 46-56. Available at: <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.05>
11. Khokhlov, V.M., Sirichenko, K.S., Umanskaya, O.V. (2017). Impact of climate change on periods of cold weather in Ukraine. *Bulletin of Odessa State Ecological University*, 22, 39-44. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodeu_2017_22_7
12. Loboda, N.S., Gopchenko, E.D. (2004). Water resources of Ukraine in connection with climatic conditions. *Ukraine: geographical problems of sustainable development: a collection of scientific papers of the ninth congress of the Ukrainian Geographical Society*, 3, 144-146.
13. Loboda, N.S. (2011). The impact of climate change on the water resources of Ukraine (modeling and forecasts based on climate scenarios). *Global and regional climate change*, 340-351. Available at: <http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/3771>
14. Loboda, N.S., Serbova, Z.F., Bozhok, Yu.V. (2014) The impact of climate change on Ukraine's water resources in current and future conditions (according to the scenario of global warming A1B). *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 15, 149-159. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uggj_2014_15_23
15. Grebin, V.V. (2010). *Modern water regime of rivers of Ukraine (landscape-hydrological analysis)*. Kyiv: Nika-Center.
16. Rakhmatullina, E.R., Grebin, V.V. (2017). Future trends of changes in the characteristics of the hydrological regime of the rivers of the Southern Bug basin in winter. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 20, 91-98. Available at: <https://doi.org/10.31481/uhmj.20.2017.11>
17. Grebin, V., Mudra, K. (2018). Forecasting the runoff on rivers of the Dniester river basin according to the REMO numeric climatic model. *World science*, № 9(37), 26-32. Available at: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092018/6131
18. Gorbacheva, L.O. (2014). Assessment of possible future changes in the water flow of rivers of Ukraine (in the middle of the XXI century). *Problems of material culture. Geographical sciences*, 89-94. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/92902>
19. Ovcharuk, V.A., Gopchenko, E.D. (2022). Engineer substantiation of estimated characteristics of maximum rivers runoff during floods under climate change, Editor(s): Sughosh Madhav, Shyam Kanhaiya, Arun Srivastav, Virendra Singh, Pardeep Singh, *Ecological Significance of River Ecosystems*, 18, 351-382. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00018-2>
20. Bolbot, G.V. (2019). Estimation of long-term fluctuations of the minimum water consumption of the rivers of the Sevversky Donets basin. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 3 (54), 31-33. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghe_2019_3_12
21. Reshetchenko, S., Dmitriiev, S., Cherkashyna, N., Goncharova, L. (2020). Climate indicators of changes in hydrological characteristics (a case of the Psyol river basin). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 53, 176-189. Available at: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-12>
22. Gorbacheva, L.O. (2015). Modern intra-annual distribution of water runoff of rivers of Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, 3, 16-23. Available at: <https://doi.org/10.15407/ugz2015.03.016>
23. Semenova, I.G., Pol'ovyy, A.M. (2020). Forecast forecast of droughts of the warm season on the territory of Ukraine in 2021-2050. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 53, 190-200. Available at: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-13>
24. Tallaksen, L.M., Van Lanen, Henny. (2004). *Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*.
25. Ovcharuk, V.A., Kushchenko, L.V., Prokofiev, O.M., Goptsiy, M.V., Andreevskaya, G.M. (2021). Minimal and ecological runoff of rivers in the zone of insufficient water content of Ukraine. *Environmental sciences*, 2 (35), 30-36. Available at: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.5>
26. Kushchenko, L.V. (2021). Research of water deficits and drought indices for the zone of insufficient water content of Ukraine. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 4 (62), 34-46. Available at: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.4.3>

27. Tabari H., Nikbakht J., Hosseinzadeh T.P. (2013). Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water Resources Management*, 27 (1), 137–151. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0173-3>
28. Kochelaba, E.I., Okorsky, V.P., Sosedko, M.N. (1990). Mathematical modeling of the processes of flood runoff formation on the territory of Polissya, taking into account thaw phenomena. *Works of UkrNIGMI*, 235, 3-18.
29. Shakirzanova, J.R., Dokus, A.O. (2021). Long-term forecasting of the characteristics of spring floods in the basin of the Southern Bug. Odesa: FOP Bondarenko MO. Available at: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/9674>
30. Shakirzanova Z.R., Dokus A.A. (2022). Territorial long-term forecasting of hydrological characteristics of spring floods of lowland rivers. *Ecological Significance of River Ecosystems*, 17, 325-350. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85045-2.00020-0>
31. Popov, E.G. (1958). *Hydrological forecasts*. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House.
32. Apollov, B.A., Kalinin, G.P., Komarov, V.D. (1960). *Hydrological forecasts*. Leningrad: GIMIZ.
33. Bodwell, V. J. (1971). Regression analysis of non-linear catchment systems. *Water Resources Research*, 7, 1118–1125. Available at: <https://doi.org/10.1029/WR007i005p01118>
34. Wright, C.E. (1975). *Monthly Catchment Regression Models: Thames Basin*. Central Water Planning Unit, Technical, 8, 32.
35. International Association of Hydrological Sciences. (1974). *Proceedings of the International Symposium on Flash Floods – Measurements and Warning*.
36. Operational Hydrology. (1990). *World Hydrological Models for Water-Resources System Design and Operation (34)*. Geneva: Meteorological Organization. Available at: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=8846#.YpPUA0pBzIU
37. Burnash, R.J.C., Ferral, R.L., McGuire R.A. (1973). *A Generalized Streamflow Simulation System: Conceptual Modelling for Digital Computers*. National Weather Service and State of California Department of Water Resources, 69.
38. Gerlinger, K., Demuth, N. (2011). The flood forecast model LARSIM application experience and evaluation of operational runoff forecasts in the Moselle basin. 2011. Retrieved from <http://www.watlab.be/en/events/files>
39. Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge J.A. (1986). An Introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeen. "SHE," 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Modelling System. *Journal of Hydrology*, 87, 61-77. Available at: [10.1016/0022-1694\(86\)90114-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90114-9)
40. Wigmosta, M.S., Vail, L., Lettenmaier, D.P. (1994). A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 30, 1665-1679. Available at: https://www.uvm.edu/~bwemple/HydroModel/DHSVM/Wigmosta_et al1994.pdf
41. Wilke, K., Rademacher, S. (2002). Operationelle Wasserstands – und Durchflussvorhersagen im Rheingebiet. *Operational forecast of water level and runoff in Rhine Catchment*. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 54, 9-10.
42. Reichel, G. (2001). FluxDSS und FLORIS2000 – ein leistungsfähiges Paket zur Modellierung der Fließvorgänge in komplexen Systemen. *Österreichische Wasserwirtschaft*, 53, 5-6.
43. Kobold, M., Suselj, K., Polajnar, J. (2008). Calibration techniques used for HBV hydrological model in Savinja catchment. *Conference abstracts XXIV-th of the Danubian countries on hydrological forecasting and hydrological bases of water management*, 14.
44. User guide of MIKE 11. (2012). *A Modelling System for River and Channels (2, 204)*.
45. Ninov, P., Ribarova, I., Nikolaidis, N. (2006). Hydrological calibration scenarios of the HSPF model for the upper Iskar basin. *Conference abstracts XXIII of the Danubian countries on hydrological forecasting and hydrological bases of water management*, 59.
46. Parey, S., Gailhard, J. (2022). Extreme Low Flow Estimation under Climate Change. *Atmosphere*, 13, 164. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13020164>
47. Hristyuk, B.F. (2014). Short-term forecasting of water levels in the Kili branch of the Danube. *Energetika*, 60 (1), 69-75. Available at:
48. Semenova, I., Ovcharuk, V., Shakhirzanova, J. (2014). On use of drought indexes in modeling hydrological processes. *Geoconference on Water Resources: Hydrology and Water Resources*, 1, 503–510. Available at: <https://doi.org/10.5593/SGEM2014/B31/S12.065>
49. Ovcharuk, V., Gopchenko, E., Kichuk, N., Shakirzanova, Z., Kushchenko, L., Myroschnichenko, M. (2020). Extreme hydrological phenomena in the forest steppe and steppe zones of Ukraine under the climate change, *Proc. IAHS*, 383, 229–235. Available at: <https://doi.org/10.5194/piahs-383-229-2020>
50. Hrebin, V.V., Mokin, V.B., Stashuk, V.A. (2013). *Methods of hydrographic and water management zoning of the territory of Ukraine in accordance with the requirements of the Water Framework Directive of the European Union*. Kyiv: Interpress LTD.
51. State Water Cadastre. (2017). *Long-term data on the regime and resources of land surface waters (for 2011-2015 and the entire observation period) (Part I. Rivers. V. 1. Basins of the Western Bug, Danube, Dniester, Southern Bug, 465)*. Kyiv.
52. Boyko, V.M., Kulbida, M.I., Adamenko, T.I. (2010). Use of geoinformation technologies in operational hydrometeorology. *Hydrology, hydrochemistry, hydroecology*, 18, 25-30.
53. Shakirzanova, Zh. R., Pogorelova, M.P., Mostiy, A.S., Blaga, A.O., Stratiychuk, O.V. (2021). Methodology for forecasting the seasonal boundary runoff of rivers of the South of Ukraine to ensure sustainable water use. *Second All-Ukrainian Hydrometeorological Congress: abstracts*, 109-110. Available at: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/>

[id/eprint/9319/1/LobodaNS_OvcharukVA_ShakirzanovaJR_Proceedings_Hydrometeorological_congress_2021_71-72.pdf](#)

54. Shakirzanova, Zh.R. (2010). *Long-term hydrological forecasts: Lecture notes*. Odesa: TPP Publishing House. Available at: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/98/1/ShakirzanovaZhR_Dovgostrokovi_gidrologichni_prognozy_KL_2010.pdf
55. Prokofiev, O.M., Goncharova, L.D. (2021). *Climatic and geographical features of precipitation distribution on the territory of Ukraine in the autumn period*. *Environmental sciences*, 2 (35), 94-98. Available at: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9156>
56. Goncharova, L.D., Prokofiev, O.M., Reshetchenko, S.I., Chernichenko, A.V. (2021). *Influence of atmospheric macro-processes on the spatial distribution of precipitation on the territory of Ukraine in the spring season*. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 27, 5-15. Available at: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/8991/1/uhmj_27_2021_5.pdf
57. *Ukrainian Hydrometeorological Center*. (2015). *Guidance document. Evaluation of the quality of methodology and accuracy (validity) of forecasts of land surface water regime*. Kyiv.
58. *A guide to determine the calculated hydrological characteristics (1984)*. Hydrometeorological publishing house: Leningrad.

Authors Contribution: Shakirzanova Zh. – statement and ways of solving the problem, analysis of results, text of the article; Ovcharuk V. – analysis of the latest research and publications, analysis of results; Dokus A. – analysis of foreign river flow forecasting models, assessment of forecasting methodology; Kushchenko L. – collection of initial data, construction of regional forecast dependencies, construction of map-schemes of forecast modules of low flow of rivers and their probabilistic characteristics; Tymko O. – establishing the empirical distribution of average monthly water discharge in the low season, construction of map schemes of forecast modules of the low flow of rivers and their probabilistic characteristics

Received 6 June 2022

Accepted 3 October 2022