

УДК 556.16.06:556.535.4/.5(477)

ТЕРИТОРІАЛЬНА МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ МЕЖЕННИХ ВИТРАТ ВОДИ ТА ОЦІНКА НАСТАННЯ МАЛОВОДДЯ РІЧОК ПІВДНЯ УКРАЇНИ

Ж.Р. Шакірманова, А.О. Блага

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
вул. Всеволода Змієнка, 2, 65000, Одеса, Україна
jannetodessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5657>

У статті досліджено особливості формування меженного стоку річок Півдня України в умовах сучасних кліматичних змін, розглянуто територіальну методику короткострокового прогнозування меженних витрат води річок та обґрунтовано підходи до просторової оцінки маловоддя та ймовірності її настання у сучасний період водності річок території. Актуальність роботи зумовлена посиленням дефіциту водних ресурсів, збільшенням частоти гідрологічних посух і необхідністю оперативного прогнозування маловоддя для забезпечення ефективного управління водними ресурсами регіону.

Метою роботи є удосконалення територіальної методики прогнозування середньодажних витрат води у періоди літньо–осінньої та зимової межні (при подовженні рядів гідрологічних спостережень, уточненні сезонних територіальних залежностей та розширенні часових меж літнього гідрологічного сезону), а також розробка підходів до просторової оцінки маловоддя та ймовірності його настання на річках Півдня України.

Встановлено, що в умовах сучасних кліматичних змін на території Півдня України спостерігається тенденція до зменшення меженного стоку річок, що пов'язано зі зростанням температури повітря та зміною режиму атмосферних опадів. Це спричиняє посилення дефіциту водних ресурсів і підвищення ризику розвитку гідрологічного маловоддя.

У дослідженні використано багаторічні ряди спостережень за витратами води на річках басейнів Південного Бугу, Нижнього Дніпра та річок Північно–Західного Причорномор'я – за період 1980–2020 рр. при удосконаленні прогнозної методики та в період до 2025 р. – для перевірки методики на незалежних даних. Застосований метод прогнозу, заснований на розрахунку характеристик виснаження стоку води в період межні у вигляді регіональних залежностей між початковими та прогнозними модулями стоку, виконані статистична оцінка методики прогнозу і картографічний аналіз просторового розподілу прогнозних характеристик. Для оцінки ймовірності настання маловоддя побудовано емпіричні криві забезпеченості меженних витрат води.

Встановлено, що територіальна методика забезпечує задовільну якість короткострокових прогнозів середньодажних витрат води з критерієм якості $S/\sigma = 0,71–0,82$ та забезпеченістю допустимої похибки 74–87%. Виявлено продовження маловодної фази стоку в сучасний кліматичний період, особливо для річок Північно–Західного Причорномор'я, де в окремі сезони спостерігається пересихання малих водотоків. Просторовий аналіз прогнозних модулів стоку та їх забезпеченості дозволив визначити райони найбільшого ризику розвитку гідрологічної посухи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх застосування у діяльності гідрометеорологічних і водогосподарських організацій, при плануванні водокористування, оцінці екологічного стану річкових басейнів та розробленні адаптаційних заходів до змін клімату.

Ключові слова: меженні витрати води, зміна клімату, водозабезпечення, дефіцит води, прогнозування, територіальна методика, оцінка настання маловоддя, критерії маловоддя, ймовірність маловоддя.

1. ВСТУП

Формування гідрологічного режиму річкових систем визначається складною взаємодією кліматичних умов, геологічної

будови території та фізико–географічних характеристик водозбору. У структурі водного режиму особливе значення має меженний період, під час якого стік формується переважно за

рахунок підземного живлення і характеризується мінімальними витратами води.

Унаслідок потепління клімату зменшення атмосферних опадів у поєднанні з підвищенням температури повітря спричиняє зростання випаровування та зниження ефективного зволоження території. Це обмежує процеси інфільтрації і, відповідно, поповнення підземних вод, що безпосередньо впливає на величину базисного стоку. За таких умов меженний стік виступає інтегральним індикатором стану водних ресурсів і дозволяє оцінити ступінь розвитку гідрологічної посухи.

Інформація про низький рівень стоку необхідна для широкого кола застосувань, які часто контролюються національним та міжнародним водним законодавством та політикою. Так, Водна Рамкова Директива 2000/60/ЄС [1] встановила стратегічну основу для сталого інтегрованого управління в межах річкових басейнів як поверхневими водними, так і підземними водними ресурсами. З метою розробки довгострокових планів розвитку річкових басейнів необхідними є й оцінки низького рівня стоку для послаблення негативного впливу штучних водозаборів на навколишнє середовище та планування й управління майбутнім розвитком водних ресурсів.

У Водному кодексі України [2] також простежується цілісний підхід, за яким інтегроване управління водними ресурсами в межах річкових басейнів безпосередньо пов'язане з урахуванням природної мінливості стоку, зокрема обмеженості та вразливості водних ресурсів у періоди маловоддя, та спрямоване на мінімізацію їх негативного впливу на економіку і довкілля. При цьому сучасне критичне зниження водності річок обумовлює необхідність регулювання режимів роботи водогосподарських систем і водосховищ з урахуванням прогнозу водності та інтересів усіх водокористувачів.

На період до 2050 року у Водній стратегії України [3] інтегроване управління водними ресурсами в межах річкових басейнів безпосередньо пов'язується з проблемою зниження водності річок і дефіциту води, які розглядаються як ключові фактори ризику для сталого розвитку економіки, що потребують системного, науково обґрунтованого та комплексного управлінського реагування.

На фоні тенденції до зниження середнього річного стоку більшості річок, обміління водних об'єктів і майже пересихання малих річок, що

зумовлено як змінами клімату, так і антропогенними чинниками, зокрема нераціональним водокористуванням, значна частина території України, особливо південні райони, вже належить до регіонів з низьким рівнем водозабезпечення, що посилює проблему дефіциту води [3].

Однією з цілей Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) є підтримка комплексного управління басейном річки за необхідності забезпечення послідовного та належного аналізу даних про навколишнє середовище, базового моніторингу та аналізу гідрологічного стоку річок, зокрема оцінювання low-flow характеристик [4]. При цьому згідно термінології Міжнародного глосарію з гідрології ЮНЕСКО та ВМО [5] та документу «Гідрологічна посуха – процеси та методи оцінки стоку та ґрунтових вод» [6] в виданнях ВМО [4,7] здійснюється аналіз формування низьководного режиму річки, оцінка та прогнозування низького стоку чи низьких витрат води в різних часових масштабах. Низький стік і пов'язані з ним маловоддя та посухи розглядаються як один із ключових ризиків для економіки та довкілля. Попередження про низькі витрати води забезпечують основу для прийняття рішень щодо розвитку водних ресурсів у масштабах усього водозбору та сприяють прийняттю спеціальних рішень у кожному окремому випадку.

Відповідно Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя, діючого в Україні [8] «Маловоддя або гідрологічна посуха – це період у гідрологічному режимі водних об'єктів з малими і дуже малими витратами води, формування та утримання яких має небезпечний вплив на сектори економіки, об'єкти господарювання, життєдіяльність населення та навколишнє природне середовище».

Так, посушливий регіон Півдня України перебуває у зоні підвищеного ризику, зумовленого дефіцитом водних ресурсів і формуванням екстремально низького стоку в меженний період. У зв'язку з цим особливого значення набувають визначення та прогнозування меженного стоку для оцінювання можливих ризиків маловоддя для водного господарства та водозалежних галузей економіки держави.

З метою завчасної оперативної оцінки водності річок у періоди гідрологічної межени на кафедрі гідрології суші Одеського національного університету імені І.І.Мечникова на основі розробленого методу територіальних короткострокових прогнозів середніх декадних

витрат води річок Півдня України здійснюється поточне прогнозування цих витрат води [9, 10], що дозволяє оцінювати ступінь маловоддя (гідрологічну посуху) річок протягом меженного періоду, а також надавати ймовірність його настання у багаторічному періоді.

Метою даного дослідження є удосконалення територіальної методики прогнозування середньодадних витрат води в період літньо-осінньої та зимової межени для завчасної оцінки маловоддя та ймовірності його настання на річках Півдня України.

Результати, викладені у статті, підготовлено в рамках науково-дослідної роботи кафедри гідрології ОНУ імені І.І. Мечникова: «Гідрологічний і гідрохімічний режими річок України в сучасних умовах водокористування і зміни клімату» (номер держреєстрації: 0123U101578).

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Головною метою прогнозування маловоддя є оцінка стоку води річок у поєднанні з майбутніми потребами у водокористуванні, враховуючи набір ознак стану басейну та кліматичних умов у заданий момент часу [4]. Математичне моделювання є ключовим інструментом дослідження та прогнозування гідрологічних процесів. Серед найбільш поширених підходів виділяють такі групи моделей як емпіричні, концептуальні та фізично обґрунтовані (розподілені) моделі, а також статистичні [4, 7].

Так, *емпіричні моделі* базуються на статистичних зв'язках між опадами та стоком води. Вони є простими у реалізації, однак мають обмежену прогностичну здатність у змінних кліматичних умовах. Такі методи прогнозування стоку річок широко використовувалися в вітчизняній практиці (в [9]).

Регресійний аналіз на основі емпіричних даних є більш гнучким інструментом, який можна використовувати для прогнозування низького стоку води [4]. Методи, засновані на регресійному аналізі річкових потоків, тобто на процесах виснаження запасів води у водозбірному басейні за відсутності дощу, забезпечують достовірний прогноз короткострокових умов потоку. Включення в прогнозну методику кількості опадів періоду перед складанням прогнозу або за період його завчасності дозволяє детальніше врахувати подальші зміни витрат води в річці.

Широкого використання в практиці прогнозування меженного стоку річок набули *концептуальні моделі*, такі як HBV або SAC–

SMA. Вони описують процеси формування стоку через резервуарні схеми та базуються на спрощеному представленні процесів водного балансу і дозволяють моделювати взаємозв'язок між опадами, випаровуванням та стоком води [11–13].

Фізично обґрунтовані (розподілені) моделі базуються на рівняннях руху води в пористих середовищах і русловій мережі. Зокрема, моделі SWAT, MIKE SHE або SHE, забезпечують детальне відтворення процесів формування стоку на основі фізичних законів. Вони враховують просторову структуру басейну та дозволяють моделювати вплив різних факторів, однак потребують значного обсягу вхідних даних і складної калібровки.

Так, модель SWAT була використана авторами [14] для визначення поширення посухи та оцінки ризику в басейні річки Наолі (на північному сході Китаю) на основі моделювання гідрологічних процесів та оцінки кількісного впливу змін клімату та землекористування на стік.

В роботі [15] високороздільну SWAT– модель застосовано для моделювання гідрологічної динаміки та динаміки поживних речовин у низовині річки Адідже (на північному сході Італії), остання має зворотній зв'язок з посушливими періодами водності річки.

Застосування розподіленої гідрологічної моделі SWAT виконано й в інших роботах авторів [16, 17] для оцінки гідрологічної посухи.

Розвитком розподілених моделей стала розробка просторово-часової моделі SWIM для прогнозування водного стоку. Зокрема, авторами [18] здійснено адаптацію гідрологічної моделі SWIM для прогнозування стоку води із добовим ходом, із завчасністю 3...7 днів рівнинних річок Казахстану. Результати ефективності моделі SWIM для рівнинних річок показали, що модель добре відтворює динаміку модельованого стоку з спостереженням та рекомендована до практичного застосування в оперативній практиці, зокрема для прогнозування паводків та посух [18].

Окрему роль відіграють *стохастичні моделі*, які моделюють часову змінність маловоддя як випадковий процес. Вони дозволяють оцінювати ймовірність екстремальних посух та періодів дефіциту води. До такого виду моделей належать авторегресивні моделі ковзного середнього (ARMA, ARIMA), які дозволяють описувати динаміку часових рядів на основі їх попередніх значень [4].

Відома також модель показника водної безпеки (The ISciences Water Security Indicator

Model, WSIM, США, 1997 р.) [19], яка дозволяє безперервно вести прогнозування водних аномалій на глобальній основі із завчасністю 1–9 місяців. При цьому модель WSIM використовує сезонні прогнози температури та опадів. WSIM визначає місця на земній поверхні у вигляді глобальних карт «гарячих точок», які зараз або за прогнозами відчуватимуть дефіцит або надлишок прісної води.

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, особливо в умовах обмеженості або відсутності даних стаціонарних спостережень за стоком річок.

Досліджувана територія Півдня України за ландшафтно – гідрологічним районуванням В.В. Гребеня [20] належить до ландшафтно – гідрологічних провінцій, зон і районів (табл.1), які мають певні особливості в розподілі кількості й співвідношенні тепла і вологи, в характері атмосферної циркуляції, відрізняються регіональними характеристиками кліматичних умов та ін.

Так, клімат визначає величину та вплив температури, опадів та потенційного випаровування протягом року. Низькі витрати води в річках виникають після періодів невеликої кількості опадів або коли опади випадають у вигляді снігу. Це призводить до зменшення кількості води, що зберігається в ґрунтах, водоносних горизонтах та озерах, і зменшення стоку в річку. Тривалість та швидкість виснаження залежить, як, від попередніх погодних умов, так й від гідрологічних процесів та властивостей зберігання вологи у водозбірному басейні [4]. Внаслідок постійно високих швидкостей випаровування кліматичний

дефіцит води після сухого сезону може зберігатися й у вологий сезон. Значний вплив кліматичних змін на маловоддя, проявляється у невеликому зменшенні кількості опадів у поєднанні зі збільшенням випаровування та температури повітря, що подовжує період маловоддя в річках.

Низькі витрати води часто описуються у річкових водозборах за сезоном їх виникнення, а саме може бути один або декілька сухих сезонів, коли виділяються один або декілька чітко виражених періодів низьких витрат [4]. У помірному кліматі найчастіший час для низької води – це кінець сухого сезону, коли суха погода може зберігатися протягом кількох тижнів. У посушливому та напівпосушливому кліматі, до якого відноситься крайній південь території, в межах Причорномор'я, поєднання невеликої кількості опадів та високого випаровування призводить до мінімальних річкових витрат води річок, часто з тривалими періодами нульового стоку протягом кількох місяців або, навіть, років.

Згідно географічного розташування водних об'єктів, що досліджуються, в межах ландшафтно-гідрологічних провінцій за районуванням в [20] та внутрішньорічного розподілу стоку наведені терміни гідрологічних сезонів, визначені в роботі [20] за рекомендаціями [21] та представлені у табл. 1. Автором [20] також проаналізовано зміни стоку річок України за два характерні періоди (до 1989 року і після нього) та встановлено, що відмінності у термінах сезонів спостерігаються для провінцій в межах степової посушливої ландшафтно-гідрологічної зони. При цьому весняний сезон в сучасний період наступає у більш ранні строки (II–IV місяці), літній сезон став триваліший (V–VIII місяці), а зимовий скоротився до періоду (XII–I місяці).

Таблиця 1 – Терміни гідрологічних сезонів для ландшафтно-гідрологічних провінцій [20]

Table 1 – Hydrological season timeframes for landscape-hydrological provinces [20]

Ландшафтно-гідрологічна провінція за районуванням в [20] (водні об'єкти)	Гідрологічний сезон (місяці)			
	весняний	літній	осінній	зимовий
Дністровсько-Дніпровська (верхня і середня частини басейну Південного Бугу, до впадіння р.Савранки)	III–V	V–VIII	IX–XI	XII–II
Нижньобузько-Дніпровська (нижня частина басейну р. Південний Буг, водозбори річок міжріччя Дністра і Південного Бугу, правобережні притоки Дніпра)	II–IV	V–VIII	IX–XI	XII–I

Причорноморсько–Приазовська (пригирлові ділянки Південного Бугу і Причорноморські річки)	II–IV	V–VIII	IX–XI	XII–I
Дніпровсько–Сіверськодонецька (ліві притоки Нижнього Дніпра)	II–IV	V–VIII	IX–XI	XII–I

На річках Півдня України, що досліджуються в роботі, найнижчі значення меженного стоку характерні для літньо–осіннього періоду, коли відбувається поступове виснаження запасів підземних вод, які забезпечують живлення річок. У зимовий період межень, як правило, є дещо вищою завдяки додатковому надходженню талих вод під час відлиг. Водночас в окремі посушливі зими межений стік може знижуватися до рівнів, близьких до літніх. Прогнози меженного стоку зазвичай складають після завершення весняного водопілля – у період, коли атмосферні опади практично відсутні, а підземна складова річкового стоку змінюється незначно в часі.

В публікації авторів цієї роботи [22] досліджено сучасні кліматичні зміни, які впливають на формування мінімального меженного стоку річок території Півдня України. Встановлено, що в сучасний кліматичний період (1991–2020 рр.) в порівнянні зі стандартною кліматичною нормою (у період 1961–1990 рр.) спостерігається підвищення температури – на сході території в середньому на 1,5–1,6 °С, в західній частині та в південних областях – на 0,9–1,1 °С, найбільші помітні зміни відмічені в літні та зимові сезони. Річна кількість опадів за два кліматичних періоди зменшилась в південних і західних областях на 28–41 мм, але ж на сході території вона збільшилася на 25–32 мм. В окремі сезони можуть спостерігатися й посухи, які виникають при тривалих бездощових періодах.

Просторово–часові узагальнення статистичних характеристик рядів мінімального меженного стоку річок Півдня України (від початку спостережень до 2020 року) [22] вказують, що починаючи із середини 1970–х років відбувся перехід від фази зниження до фази підвищення циклічних коливань мінімальних витрат води літньо–осінньої межени. Однак із 2007–2008 років у басейні р. Південний Буг, а з 2012–2016 років – у басейнах річок Причорномор'я та Нижнього Дніпра, знову спостерігається перехід до маловодної фази, яка тривала до 2020 року. Для зимового періоду межени характерною була маловодна фаза, що тривала до 1980–х років, після чого її змінила багатоводна. Починаючи з 2016–2018 років, мінімальні витрати води знову виявляють

тенденцію до зменшення, яка простежується до 2020 року [22].

Оперативна оцінка настання (ймовірності настання) маловоддя (гідрологічної посухи) основних річок України, відповідно Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя [8], здійснюється Українським гідрометеорологічним центром ДСНС України (УкрГМЦ) [23] та його основними підрозділами у створах діючих гідрологічних постів окремо для періоду весняного водопілля (лютий–травень) та меженного періоду (червень–листопад).

Обов'язковий перелік об'єктів та створів гідрологічних постів, для яких виконується оцінка водності для визначення настання (загрози настання) маловоддя (гідрологічної посухи) та яким загрожує його формування (при наявності таких) входять до складу Каталогу небезпечності гідрологічних явищ (Додаток 2 Положення [8]). Для території Півдня України, що досліджується в роботі, такий перелік з [8] наданий в табл. 2.

Оперативна оцінка маловоддя виконується за результатами щоденних гідрометеорологічних даних, з огляду погоди та стихійних гідрометеорологічних явищ на території України, у їх порівнянні до середньої багаторічної та екстремальної водності річок відповідного календарного місяця чи сезонну, об'ємів весняного водопілля, опублікованих режимних видань багаторічних даних спостережень (БДС). Такий аналіз оцінки настання (загрози настання) маловоддя здійснюється в основних та допоміжних *критеріях настання та впливу маловоддя* на сектори економіки, населення, навколишнє природне середовище (згідно Додатку 1 Положення [8]).

При підготовці оперативної інформації та висновку щодо формування та впливу маловоддя на сектори економіки, населення, навколишнє природне середовище УкрГМЦ [23] оцінюють поєднання комплексу усіх критеріїв (по відношенню до місячної норми, норми наймаловоднішого місяця, до екологічної витрати води) [8].

Інформування про настання чи загрозу настання маловоддя виконується й з урахуванням складених гідрологічних довгострокових та короткострокових прогнозів (консультацій,

уточнень) та попереджень (максимальних витрат та об'ємів весняного водопілля, середніх місячних / декадних витрат води) в прогностичних створах, оцінки прогнозованого інтервалу водності по відношенню до опублікованих в БДС середніх багаторічних

значень та до критеріїв маловоддя з метою завчасного і більш детального інформування про настання / загрозу настання маловоддя [8].

Таблиця 2 – Перелік основних водних об'єктів та гідрологічних постів за витратами води, в яких виконується оцінка водності для визначення настання (ймовірності настання) маловоддя (гідрологічної посухи) (Додаток 2 Положення [8])

Table 2 – List of major water bodies and hydrological gauging stations by water discharge, used for streamflow assessment to determine the occurrence (probability of occurrence) of streamflow deficit (hydrological drought) (Annex 2 of the Regulation [8])

№з/п	Річка (водосховище)	Пост	Гідрометеорологічні організації, які виконують оцінку водності	
			Оцінка елементів весняного водопілля	Оцінка водності меженного періоду
1	Оріль	Царичанка	УкрГМЦ	УкрГМЦ
2	Самара	Кочеріжки	УкрГМЦ	УкрГМЦ
3	Інгулець	Кривий Ріг	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
4	Південний Буг	Тростянич	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
5	Південний Буг	Підгір'я	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
6	Південний Буг	Олександрівка	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
7	Синюха	Синюхин Брід	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ
8	Інгул	Кропивницький	ГМЦ ЧАМ	ГМЦ ЧАМ

3. ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження. Досліджувана територія Півдня України охоплює річки басейну Південного Бугу та суббасейну Нижнього Дніпра, річки Північно – Західного Причорномор'я [24, 25]. Відповідно до фізико-географічного районування України розглядувана територія розташована в межах лісостепової і степової географічних зон [24], що обумовлює широку різноманітність природних умов (кліматичних, гідрогеологічних, орографічних і гідрографічних) формування гідрологічного режиму річок. Слід зазначити, що з метою цілісності басейну Південного Бугу в дослідженні залучена ще й верхня його частина, що розташована у зоні широколистяних лісів.

При розробці й удосконаленні територіальної методики прогнозування середньодадних витрат води в період літньо-осінньої та зимової межени для завчасної оцінки маловоддя та ймовірності його настання на річках Півдня України використані дані про витрати води в основних гідрометричних створах річок, по яких ведеться розробка прогностичної методики, за переліком дещо ширшим, ніж у табл.2 та представленим в [9]. Згідно рекомендацій ВМО [8] часові рамки вимог до даних про річковий

стік у дослідженнях маловоддя, при зазвичай відносно не великій протягом періодів маловоддя швидкості зміни потоку використовуються дані з добовою роздільною здатністю (середньодобовий стік), тижневі (7-денний середній стік), 10-денні та місячні (середньомісячний стік). При цьому часові ряди повинні бути якомога довшими, а саме тривалістю 30 років або більше [6]. Подібні вимоги до тривалості ретроспективного періоду щодо розробки методик прогнозування річкового стоку встановлено й в вітчизняних керівних документах [26, 27].

Тому до дослідження були прийняті дані гідрологічних спостережень за стоком води основних річок території (щоденні та середні за декади й місяці, характерні витрати води) за багаторічний період спостережень з 1980 до 2020 рр., що розміщені в офіційних виданнях Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського [28], а саме в [29, 30]. Часові ряди стокових спостережень подовжено до 2020 р. з метою удосконалення методики територіальних прогнозів межених витрат води, яка представлена в роботах [9, 10].

В керівництвах ВМО [4, 7, 31], а також в керівних документах [26, 27] значна увага приділяється перевірці справдженості та якості гідрологічних прогнозів, виявляючи

сильні та слабкі сторони методики, а з'ясування деякої невизначеності та помилок прогнозів спрямовують до удосконалення систем прогнозування, що зрештою дозволяють приймати більш обґрунтовані та ефективні рішення при використанні прогностичної інформації.

В такому разі аналіз водності річок та оперативне прогнозування стоку в меженний період року відбувалося за територіальною методикою прогнозування меженних витрат води й у період до 2025 р. за даними Українського Гідрометцентру ДСНС України [23], що сформовані в автоматизованій, спеціально розробленій системі керування гідрологічними даними у вигляді текстових файлів (у електронній таблиці Microsoft Excel), у базі даних АРМ-гідро [32].

Методичні основи прогнозів меженного стоку витікають з закономірностей процесу поступового виснаження води, що зберігається у водозбірному басейні в періоди з невеликою кількістю опадів або їх відсутністю та відображається у формі кривої спаду гідрографа стоку.

Стійкість кривих спаду паводків при інерційності підземного живлення та незначному припливі води в річкову мережу дозволяє широко застосовувати методи екстраполяції ходу рівнів і витрат води по тенденції їх зміни, яка обумовлена запізненням реакції річкового стоку на зміну кліматичних умов та зберігається протягом деякого часу й дає фізичну підставу прогнозування гідрологічних процесів [4, 9].

Екстраполяція ходу рівнів і витрат води спаду повені або паводків у часі за рахунок виснаження запасів води (метод тенденцій) можна описати рівнянням вигляду [4, 33]

$$Q_t = (Q_0 - q) \cdot e^{-\alpha t} + q, \quad (1)$$

де Q_t – витрата у замикаючому створі річки в момент часу t ; Q_0 – витрата води в річці в початковий момент часу t_0 , м³/с; q – базисна витрата, яка обумовлена глибоководним живленням, м³/с; t – час в добах від моменту часу t_0 , на який приймається початкова витрата води Q_0 ; α – параметр, який є показником інтенсивності виснаження підземних вод.

Параметри α і q залежать від гідрогеологічних умов і змінюються для різних за площею басейнів. Так, параметр α

зменшується зі збільшенням площ водозборів та змінюється з року в рік у зв'язку зі змінами запасів ґрунтових вод.

У всіх цих випадках залежності, що враховують закономірності ходу рівнів (витрат) води в даному створі протягом попереднього періоду часу (метод тенденцій) будують за даними за невеликий період часу і коефіцієнти постійно уточнюють, що знижує їх об'єктивність і утруднює використання в прогнозах. Рівняння (1) частіше використовують в період підйому рівнів води для прогнозів з малою завчасністю.

Слід зазначити, що екстраполяція на невеликий період дає задовільні результати для крупних річок, де підйом і спад рівня характеризується плавністю і великою тривалістю. Можливість упевненого екстраполювання рівня або витрати води на середніх річках значно зменшується вважаючи на різкі і нетривалі підйоми і спади рівня води. Метод тенденцій ж на малих річках, з середньою тривалістю стійких підйомів і спадів 5–6 діб, не може бути використаний навіть при завчасності прогнозу, що дорівнює однієї доби.

Враховуючи, що на території Півдня України, що розглядається переважають річки із площею водозборів 500–2000 км² (їх 31), <500 км² – 9 постів, також 9 постів із площею водозборів 2000–5000 км², і площу водозбору > 10000 км² – займають 6 постів, тобто ті, що згідно з Водним кодексом України [2] відносяться до середніх (з площею водозборів 2–50 тис. км²) і малих (за розміром водозборів менше 2 тис. км²) річок [34] в роботі був застосований метод прогнозу меженного стоку [9], заснований на розрахунку характеристик кривої спаду стоку води в період межені. При цьому, з використанням щоденних даних стоку річки встановлюються зв'язки пар значень – запасів води в річковій мережі чи попередньої витрати води в момент часу t (як показника запасів води на водозборі й в руслі) та витрати води в наступний період її зміни (наприклад, середніх витрат води за період часу Δt).

Для річок Півдня України у літній та осінній періоди, як для зони недостатнього зволоження при невеликій кількості опадів або малої змінності їх кількості розробка методики прогнозу меженного стоку полягає в будові залежностей вигляду [9, 33]

$$\bar{Q}_{t+\Delta t} = f(W_t) \quad (2)$$

або

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

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.

Наявність такої залежності для конкретної річки встановлюють шляхом побудови залежностей типу (2) або (3) на основі багаторічних рядів спостережень та подальшої оцінки статистичної точності отриманої прогнозової залежності. Подібні залежності, як правило, формують окремо для кожного місяця літнього й осіннього періодів, що дає змогу врахувати особливості гідрометеорологічних умов формування меженного стоку в межах різних гідрологічних сезонів. Точність прогнозів у такому разі буде вищою за умови меншого впливу дощових опадів на формування меженного стоку в літньо–осінній період у межах досліджуваного району. Для зимового сезону межені слід додатково враховувати надходження до руслової мережі талих і дощових вод, пов'язаних із зимовими відлигами, що у прогнозних розрахунках реалізувати доволі складно.

Просторова неоднорідність умов формування стоку, як акцентується в керівництвах ВМО [4, 7], зумовлює необхідність застосування методів ймовірного підходу до оцінки прогнозних величин та геоінформаційного аналізу представлення прогностичної продукції.

Задача встановлення забезпеченості або ймовірності перевищення (ймовірності настання) прогнозних величин у багаторічному розрізі ($P\%$), що є особливо важливим при оцінці виникнення маловоддя річок вирішується в даному методі шляхом побудови емпіричних кривих забезпеченості середніх витрат води меженного періоду за багаторічними рядами стокових спостережень [35].

З метою ж просторового аналізу прогнозних величин меженного стоку та моніторингу очікуваної водності в періоди маловоддя річок в роботі обґрунтований картографічний метод при регіональному узагальненні прогнозних модулів стоку річок Півдня України (л/(с·км²)) та прогнозних ймовірностей їх настання у багаторічному розрізі ($P\%$). Просторовий аналіз дозволяє ідентифікувати зони підвищеного ризику дефіциту водних ресурсів і формує основу для прийняття управлінських рішень.

ВМО вважає одним із ключових напрямів визначення екологічно допустимого стоку

(environmental flow), який забезпечує підтримання функціонування водних екосистем [4]. Мінімальні витрати води використовуються як базовий критерій для встановлення екологічних обмежень у регулюванні водокористування.

Оперативна оцінка настання маловоддя річок в Україні здійснюється за встановленими критеріями маловоддя (Додаток 1 Положення ...[8]).

Основним критерієм маловоддя для середньомісячної витрати води у меженний період є величина 20 % і менше норми відповідного місяця тривалістю 1 місяць та більше. Але в критичних ситуаціях у меженний літньо–осінній період, коли маловоддя утримується (за основним критерієм) упродовж місяця та довше, додатково виконують оцінку місячної водності за допоміжними критеріями оцінки настання маловоддя, тобто порівняно з величиною 20 % норми наймаловоднішого місяця літньо–осіннього періоду (періоду відкритого русла) тривалістю 1 місяць та більше, а також за досягнення, утримання значення екологічної витрати води та зменшення нижче неї упродовж 1 місяця і більше, незалежно від фази гідрологічного режиму/періоду року [8].

Наймаловоднішим місяцем літньо–осіннього періоду річок у багаторічному розрізі (за даними режимних видань [29, 30]) є, головним чином, серпень місяць для річок басейну Південного Бугу і річок Причорномор'я та вересень – для річок суббасейну Нижнього Дніпра (за винятком р. Інгулець, для якого наймаловоднішим є місяць жовтень).

За визначенням в Положенні .. [8], екологічна витрата води є критичним показником для функціонування екосистеми річки. Значення екологічної витрати води є сталим розрахованим показником для кожного гідрологічного поста на річках та згідно [36] обчислюється як 75% середньої витрати наймаловоднішого місяця меженного періоду року 95% забезпеченості (за об'ємом річного стоку).

4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Річки території Півдня України, особливо в межах Північно–Західного Причорномор'я є недостатньо вивченими у гідрологічному відношенні [9]. В керівництві ВМО [4] регіоналізація є ключовим підходом у випадках недостатності спостережень або їх відсутності на

конкретних водозборах. Основна ідея полягає у використанні гідрологічно однорідних регіонів для узагальнення статистичних характеристик маловоддя між басейнами з подібними фізико-географічними умовами. Регіональні моделі дозволяють підвищити надійність оцінок мінімального стоку та зменшити невизначеність прогнозів.

З метою завчасної оцінки водності річок у періоди гідрологічної межні запропоновано територіальну методику прогнозування середніх декадних витрат води річок Півдня України [9, 10], а в цьому дослідженні її удосконалено при часовому розширенні періоду літньої межні, тобто включенні травня місяця (згідно табл. 1), подовженні часових рядів витрат води станом до 2020 року, а також перевірки методики прогнозу на незалежних даних в період до 2025 р. Обґрунтовано підходи до просторової оцінки маловоддя та ймовірності її настання у сучасний період водності річок території, що розглядається.

4.1 Обґрунтування та аналіз територіальних прогнозних залежностей меженного стоку річок Півдня України

В основу прогнозу меженного стоку річок Півдня України покладено метод прогнозу, заснований на розрахунку характеристик виснаження стоку води в період межні у вигляді регіональних залежностей середньодекадних витрат води у замикаючому створі річки у вигляді (3). В якості предиктора прийнята витрата води на останній день попередньої декади (на дату складання прогнозу), що характеризує руслові запаси води в річці, які підлягають процесу виснаження в період завчасності прогнозу. У зв'язку з тим, що діапазон площ опорних водозбірних басейнів суттєво коливається (від 1130 км² р. Рів – с. Демидівка до 24600 км² р. Південний Буг – с. Підгір'я) побудова регіональних прогностичних залежностей виконувалася в одиницях питомого стоку – модулів стоку води.

В роботі, за вихідними даними про щоденні та середньодекадні витрати води для кожного місяця літнього, осіннього і зимового гідрологічних сезонів, згідно табл.1 (за період з травня по січень) по опорним гідрологічним постам річок Півдня України [9] побудовані узагальнені прогностичні залежності у вигляді

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

де $\bar{q}_{t+\Delta t}$ – середній модуль стоку води за період часу Δt , л/(с·км²); q_t – модуль стоку у замикаючому створі річки на дату випуску прогнозу t , л/(с·км²).

Такі емпіричні сезонні залежності декадного стоку встановлюються за даними багаторічних гідрологічних спостережень та ведеться оцінка точності отриманих прогнозних залежностей. Дата складання прогнозу декадного стоку t , на яку визначається величина q_t , береться 10, 20–те, чи 30(31)–те число кожного місяця, а період часу для завчасності прогнозу Δt становить 10 діб (в межах однієї календарної декади).

Обґрунтування та територіальне узагальнення прогнозних залежностей меженного стоку для річок Півдня України здійснено відповідно географічного розташування водних об'єктів в межах ландшафтно-гідрологічних провінцій за районуванням в [23], які мають певні кліматичні особливості в розподілі кількості й співвідношенні тепла і вологи. При аналізі угруповань річкових басейнів при побудові територіальних залежностей враховані також результати статистичної кластеризації кількості опадів за місяці у літній [37], осінній [38] і зимовий [39] сезони року, відповідно закономірностям розподілу опадів територією з карто-схемою районування місячної кількості опадів на території України.

Таке районування території України дало авторам [37-39] можливість деталізувати загальний кліматичний розподіл атмосферних опадів упродовж окремих календарних сезонів, а також виокремити території з різними типовими умовами формування погодних процесів, пов'язаних із випадінням опадів. Авторами [39] встановлено, що кластеризація атмосферних опадів, у зимовий період (грудень–січень), коли відбувається накопичення твердих опадів, виявляє окремі однорідні особливості їх формування для лівобережної та правобережної частин Півдня України, у межах яких виділяються два самостійні кластери. У травні ж місяці на всій досліджуваній території спостерігаються близькі за характером умови формування опадів, унаслідок чого всі області об'єднуються в межах одного кластеру. В літні [37] й осінні [38] місяці при більш неоднорідному розподілі опадів на даній території виділено по 3–4 кластери клімато-географічних особливостей розподілу опадів. Отже, протягом більшої частини року, за винятком травня, простежується

формування декількох груп часових рядів, для яких характерна схожа динаміка змін атмосферних опадів [37, 39].

Аналіз побудованих в роботі регіональних прогностичних залежностей показав, що для місяців з травня по січень має місце розкид точок відносно лінії регресії, але деякі точки розташовані нерівномірно по відношенню до інших, про що свідчать межі допустимих похибок для кожного місяця. Для прикладу представлено територіальну прогностичну залежність для річок басейну р. Південний Буг (верхня та середня течії) для серпня місяця (рис.1).

На точність прогностичних графіків у вигляді $\bar{q}_{t+10} = f(q_t)$ літнього, осіннього та зимового стоку в межах певної території впливає варіація опадів. Під час побудови цих графіків обсяг опадів визначають за двома джерелами: фактичними даними на час складання прогнозу та синоптичним прогнозом на поточну декаду. При цьому особливості будови річкової системи враховуються через специфіку методів розрахунку стокоформуєчих опадів при неодноразовності їх добігання з різновіддалених частин водозбору до замикаючого створу річки [33].

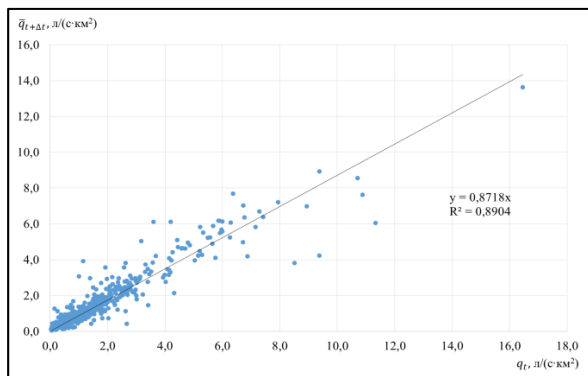


Рис. 1 – Територіальна залежність для короткострокових прогнозів середньодекадних модулів меженного стоку річок басейну р. Південний Буг (верхня та середня течії) (для серпня місяця) (1980–2020 рр.)

Fig. 1 – Territorial relationships for short-term forecasting of mean decade low-flow runoff modules for the rivers of the Southern Bug River basin (upper and middle reaches) (for August) (1980–2020)

За критерій якості методики короткострокових прогнозів меженного стоку рівнинних річок території прийняте відношення середньої квадратичної похибки S до середнього квадратичного відхилення σ_{Δ} й забезпеченості допустимої похибки $P\%$ [26, 27, 31].

Територіальна методика короткострокових прогнозів середньодекадних витрат води меженного літнього, осіннього та зимового стоку річок Півдня України має задовільну якість при інтервалі коливання критерію якості методики S/σ_{Δ} на рівні 0,71 – 0,82 та забезпеченості допустимої похибки перевірних прогнозів $P\%$ в межах 74–87%.

Слід зазначити, що подовження рядів спостережень за витратами води до 2020 р. суттєво не змінило результат оцінки методики для ряду до 2015 р. [9], у зв'язку з продовженням маловодного періоду у наступні роки [22]. Також спостерігається висока забезпеченість перевірних оцінок прогностичної методики для літнього і осіннього періодів, особливо в південних і західних областях території, що розглядається, де кількість річних опадів зменшилась в сучасний кліматичний період [22]. Для зимового сезону характерними є відлиги, що порушують режим межені при надходженні тало-дошових вод та впливають на точність прогнозів середньодекадних витрат води річок цього гідрологічного сезону.

4.2 Оцінка настання маловоддя річок Півдня України

Територіальна методика прогнозування межених витрат води дозволяє здійснювати поточне прогнозування витрат води та оцінювати настання (ймовірності настання) маловоддя річок протягом меженного періоду в різні його сезони, оскільки воно негативно впливає на життєдіяльність населення та екологічну ситуацію на водних об'єктах. Як було вказано вище, оперативна оцінка настання (ймовірності настання) маловоддя (гідрологічної посухи) здійснюється відповідно Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя [8].

З метою оперативної оцінки ймовірності настання маловоддя річок в прогностичному методі здійснюється встановлення забезпеченості або ймовірності перевищення прогностичних величин у багаторічному періоді ($P\%$). З цією метою побудовані емпіричні криві забезпеченостей середньомісячних модулів стоку в літній, осінній та зимовий сезони межені (за період 1981–2020 рр.). Такі криві узагальнені для басейнів річок Півдня України відповідно угрупованню прогностичних залежностей за територією. Ймовірність настання низьких

витрат води у багаторічному періоді $P\%$ встановлюється по кривих емпіричного розподілу для прогнозних модулів середньодадних витрат води (рис.2).

Особливістю емпіричного розподілу середньомісячних витрат води річок Північно-Західного Причорномор'я (на прикладі рр. Тилігул та Великий Куяльник) є те, що при забезпеченості меженних витрат води на рівні 30 % в малих та середніх річках території спостерігається відсутність стоку у всіх сезонах межені, тобто річки пересихають або перемерзають (рис.2). При цьому категорія «Пересихання (відсутність стоку) упродовж 1 місяця і більше» відмічена у Додатку 1 «Визначення критеріїв маловоддя» Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя [8].

Просторовий моніторинг очікуваних меженних витрат води, у тому числі при настанні маловоддя здійснюється в прогностичному методі при картографічному представленні прогнозних модулів стоку ($\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$) річок Півдня України та їх ймовірнісних характеристик ($P\%$), що дозволяє здійснювати оцінку водності очікуваної межені річок у будь-якій частині території, незалежно від стану її гідрометеорологічної вивченості.

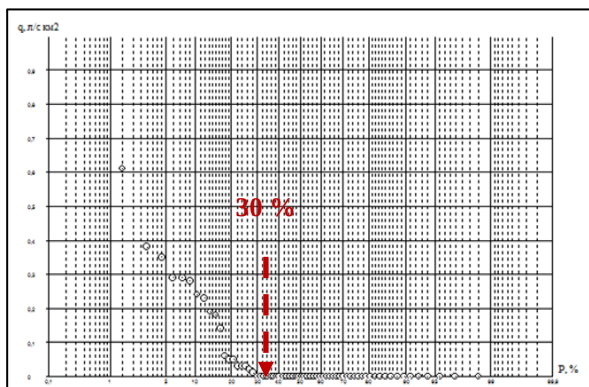


Рис. 2 – Емпіричний розподіл середньомісячних модулів стоку періоду літньої межені річок Причорномор'я (за період 1981–2020 рр.)

Fig. 2 – Empirical distribution of mean monthly summer low-flow runoff modules in Black Sea rivers (for the period 1981–2020)

На кожну дату складання прогнозу за територіальною методикою будуються карти ізоліній прогнозних величин середньодадних витрат води (модулів стоку $\bar{q}_{t+10}$) та їх ймовірнісних характеристик ($P\%$) по опорних гідрологічних створах, по яких ведеться прогнозування стоку води (наприклад, при

використанні програми Surface Mapping System Surfer Version 11.6.1159).

Розподіл по території прогнозних величин середньодадних модулів стоку літньої межені (наприклад, для третьої декади серпня 2025 р.) та їх прогнозних забезпеченостей на річках Півдня України – рр. Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра представлений на рис. 3.

Так, у третій декаді серпня 2025 р. прогнозовані модулі стоку $\bar{q}_{t+10}$ змінювалися в верхів'ях Південного Бугу від 0,4–0,2 $\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ при забезпеченості $P\%$ 80–90% і нижче (в басейні р.Синюха). В південній нижній течії Південного Бугу, річок північно-західного Причорномор'я та на лівобережній частині території (в басейнах рр. Оріль і Самара) прогнозні величини становили 0,2 $\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ і менше при забезпеченості $P\%$ 80–90 %. Слід відзначити, що для річок Тилігул і Великий Куяльник у третю декаду серпня 2025 р. прогнозувалося їх пересихання, але забезпеченість нульових модулів стоку становить 30% (як показано на рис.3 а і б).

В басейні р. Інгулець, у зв'язку із значною зарегульованістю річки каскадом водосховищ прогнозні модулі стоку були достатньо високими і коливалися в межах 0,8–2,0 $\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ при високій забезпеченості (при $P\% = 50\text{--}30\%$).

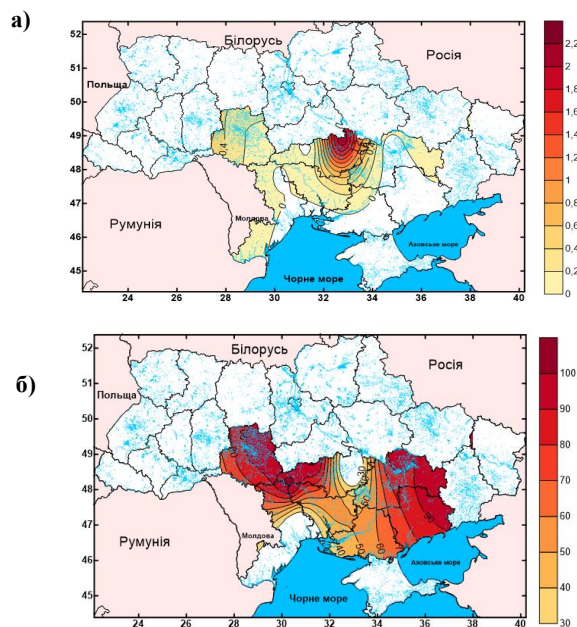


Рис. 3 – Розподіл по території Півдня України а) прогнозних величин середньодадних модулів стоку періоду літньої межені ($\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$) та б) їх забезпеченості ($P\%$) у третій декаді серпня 2025 р.

Fig. 3– Spatial distribution across Southern Ukraine of a) forecast mean decade summer low-flow runoff modules ($\text{л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$) and b) their probability of exceedance ($P\%$) in the third decade of August 2025

Таким чином, використання таких карт ізоліній прогнозних модулів меженних витрат води забезпечує можливість проведення просторового аналізу водності річок у меженний період на території Півдня України, включаючи й ті річки, які не охоплені гідрологічними спостереженнями. Розподіл по території прогнозних забезпеченостей меженних витрат води дає уявлення про ймовірнісні характеристики виникнення низьких витрат води у багаторічному періоді в цілому по регіону Півдня України.

Для оперативної оцінки настання маловоддя річок, зняті з карт ізоліній (для центру тяжіння водозбору) прогностичні величини середньодадних модулів стоку періоду межени (рис.3а) повинні порівнюватися, відповідно Положення про порядок оцінки та інформування маловоддя... [8], з встановленими основними (іноді й додатковими) критеріями маловоддя (Додаток 1 Положення ...[8]).

Результати перевірних прогнозів середньодадних витрат води річок Півдня України здійснені в роботі для третьої декади серпня 2025 року. Аналіз гідрометеорологічних умов 2025 року [40, 41] показав, що межень літа

— осені відзначалася тривалістю, глибиною та просторовим поширенням. Річки території Півдня України перебували у маловодному стані безперервно майже з зими та весни до жовтня, а на деяких річках території й у листопаді місяці витрати води були нижчими та значно нижчими за місячну норму або близькими до критеріїв маловоддя. На річках Півдня України (у степових і лісостепових районах) водність не перевищувала 40–20% і менше, що створило напружену гідрологічну ситуацію у цьому році, ускладнило водогосподарське забезпечення та зумовило розвиток гідрологічної посухи.

Для оцінювання настання маловоддя річок у третій декаді серпня 2025 року в роботі виконане порівняння прогнозних середньодадних витрат води із встановленими в [8] критеріями маловоддя річок.

Так, за основним критерієм (20 % і менше норми серпня місяця тривалістю 1 місяць та більше) прогнозовані витрати води майже по всіх річках території (за винятком р. Інгулець при її зарегульованості водосховищами) попередньо вказували на настання маловоддя річок Півдня України, причому із завчасністю 10 діб.

За допоміжними критеріями маловоддя прогнозовані середньодадні витрати води у третю декаду серпня 2025 р. майже по всіх річках території також вказували на формування маловоддя на річках, їх значення були близькими або меншими за значення 20 % норми наймаловоднішого місяця літньо–осіннього періоду (періоду відкритого русла) (рис.4а) та досягали та утримувалися значень розрахункових екологічних витрат води (рис.4б).

Ймовірності настання прогнозних значень витрат води річок Півдня України (рис.4б) – в основному 85–95% і нижче (для річок Північно-Західного Причорномор'я на рівні 30%, що відповідає їх пересиханню (відсутності стоку) [8]). В басейні ж р. Інгулець при значній зарегульованості річки каскадом водосховищ при достатньо високих прогнозних модулях стоку відмічалася їх висока забезпеченість – на рівні 30% і вище.

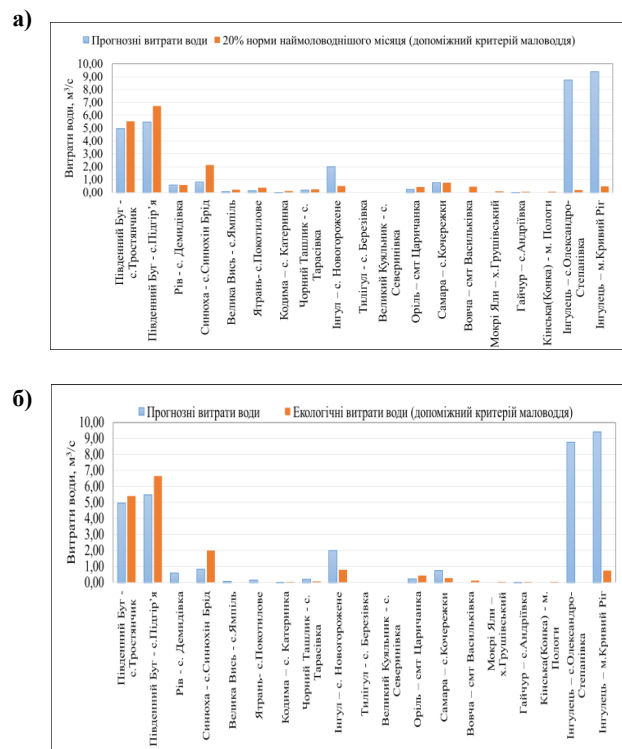


Рис. 4 – Порівняння прогнозних середньодадних витрат води із допоміжними критеріями маловоддя: а) 20 % норми наймаловоднішого місяця літньо–осіннього періоду і б) розрахунковими екологічними витратами води на річках Півдня України для третьої декади серпня 2025 року

Fig. 4 – Comparison of forecast mean decade water discharges with auxiliary streamflow deficit criteria: a) 20% of the long-term mean for the driest month of the summer–autumn period, and b) calculated ecological flows for the rivers of Southern Ukraine for the third decade of August 2025

Такі результати свідчать про можливість попередньої оцінки формування настання маловоддя чи гідрологічної посухи річок Півдня України на основі територіальної методики прогнозу меженних витрат води річок території. Ймовірнісні ж характеристики меженного стоку $P\%$ дають змогу надавати оцінку можливого виникнення (ймовірності настання) маловоддя у багаторічному періоді.

5. ВИСНОВКИ

1. В результаті виконаного дослідження удосконалено територіальну методику короткострокового прогнозування середньодадних витрат води річок Півдня України шляхом подовження рядів гідрологічних спостережень до 2020 року, уточнення сезонних територіальних залежностей, розширення часових меж літнього гідрологічного сезону (при включенні травня місяця), перевірки прогнозової методики на незалежних даних в період до 2025 р.

2. Встановлено, що сучасні кліматичні зміни на території Півдня України супроводжуються підвищенням температури повітря, зміною режиму атмосферних опадів та посиленням дефіциту водних ресурсів, що призводить до зниження меженного стоку річок і збільшення ризику формування маловоддя.

3. Доведено, що використання територіальних прогнозних залежностей дозволяє враховувати особливості формування меженного стоку в різних фізико-географічних умовах Півдня України та забезпечує можливість оперативного прогнозування водності річок навіть за обмеженої кількості гідрологічних даних.

4. Оцінка якості прогнозної методики показала її задовільну ефективність: значення критерію якості S/σ становлять 0,71–0,82, а забезпеченість допустимої похибки перевірних прогнозів досягає 74–87 %, що підтверджує можливість практичного застосування методики в оперативній гідрологічній практиці.

5. Встановлено, що найбільш складна ситуація з водністю формується для річок Північно-Західного Причорномор'я, де в посушливі періоди спостерігаються випадки пересихання або відсутності стоку.

6. Побудовані емпіричні криві забезпеченості меженних витрат води дозволяють оцінювати ймовірність настання маловоддя у багаторічному розрізі та можуть бути використані для завчасного інформування про розвиток гідрологічної посухи.

7. Запропонований картографічний підхід до просторового представлення прогнозних модулів стоку та їх забезпеченості надає можливість моніторингу водності річок, включаючи й періоди маловоддя, навіть у недостатньо вивчених районах та оцінювати райони найбільшого ризику розвитку гідрологічної посухи.

8. Результати дослідження мають практичне значення для діяльності гідрометеорологічних і водогосподарських організацій та можуть бути використані при управлінні водними ресурсами, екологічному моніторингу річкових басейнів і розробленні адаптаційних заходів до змін клімату.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради «Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики» від 23 жовтня 2000 року.
https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text URL: (дата звернення: 20.01.2026)
2. Водний кодекс України. Кодекс України, Закон, Кодекс від 06.06.1995 № 213/95–ВР Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, № 24, Ст. 79 із змінами, внесеними згідно із Законами № 1641–VIII від 04.10.2016, № 1054–IX від 03.12.2020 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 20.01.2026)

3. Водна стратегія України на період до 2050 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 9 грудня 2022 р. № 1134-р. – Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80> (дата звернення: 25.01.2026).
4. Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational hydrology report (OHR). No. 50. WMO-No. 1029. 2008. 138 p. URL: <https://library.wmo.int/rec-ords/item/32176-manual-on-low-flow-estimation-and-prediction> (дата звернення: 07.02.2026)
5. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization, 1992: *International Glossary of Hydrology*. Second edition, UNESCO, Paris.
6. Tallaksen, L.M. and H.A.J. van Lanen (eds), 2004: *Hydrological Drought – Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater*. Developments in Water Science, 48, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
7. Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction WMO-No. 1274, 2021 edition, World Meteorological Organization, 2021. 77 p. URL: <https://library.wmo.int/idurl/4/57915> (дата звернення: 15.02.2026)
8. Положення про порядок оцінки та інформування про маловоддя (гідрологічну посуху) на водних об'єктах суші України. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2020. 13 с. введено в дію наказом УкрГМЦ № 123 від 14 грудня 2020 р.
9. Екстремальні гідрологічні явища на річках Півдня України: розрахунки і прогнози : монографія / за ред. В.А. Овчарук та Ж.Р. Шакирзанової. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2024. 674 с. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13144/>
10. Шакирзанова Ж.Р., Овчарук В.А., Докус А.О., Кущенко Л.В., Тимко О.С. Ймовірісно-прогностичний метод для визначення меженних витрат води річок Південного Бугу, Причорномор'я та Нижнього Дніпра. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна*, серія «Геологія. Географія. Екологія». Вип. 57. 2022. С. 251–267. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-19>
11. Lindström G. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. December 1997. *Journal of Hydrology* 201(1–4):272–288. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00041-3.
12. Guo, J.; Zhang, F.; Li, W.; Yang, A.; Fan, Y.; Li, J. Runoff Prediction in the Xiangxi River Basin Under Climate Change: The Application of the HBV-XGBoost Coupled Model. *Water* 2025, 17(16), 2420. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17162420>
13. Estimation of uncertainty sources in the projections of Lithuanian river runoff / Kriauciuniene J., Jakimavicius D., Sarauskienė D. et al. *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2013. 27. Pp. 769–784. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0608-7>
14. Liu, T.; Si, Z.; Zhao, Y.; Wang, J.; Liu, Y.; Wang, L. Drought Propagation and Risk Assessment in the Naoli River Basin Based on the SWAT-PLUS Model and Copula Functions. *Sustainability* 2025, 17, 8219. p.1–28. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17188219>
15. Pedretti, D.; Camera, C.A.S.; Libera, N.D.; Pasini, S.; Gelmini, Y.; Braidot, A. High-Resolution Flow and Nutrient Modeling Under Climate Change in the Flat, Urbanized and Intensively Cultivated Adige River Lowland Basin (Italy) Using SWAT. *Hydrology*. 2025, 12, 239. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology12090239>
16. Nourani, V., Abbasi, H., Salehi, A.H. et al. Reconstructing Hydrological Drought Using SWAT, Deep Learning Models, and SSI. *Water Resour Manage* 40, 211 (2026). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04372-7>
17. Maragkaki, A.; Nerantzaki, S.D.; Jayyousi, A.; Halasah, S.; Albalawneh, A.; Hamdi, L.; Lilli, M.A.; Efstathiou, D.; Naimat, M.A.; Jaafreh, S.A.; et al. Hydrological and Geochemical Modeling of Water Availability and Quality in the Jordan Valley Under Climate Change. *Water* 2026, 18, 721. DOI: <https://doi.org/10.3390/w18060721>
18. Нурбашина А.А., Дидовец Ю., Лобанова А. Адаптация гидрологической модели SWIM для прогнозирования стока равнинных рек Казахстана во время паводков/половодья. *Гидрометеорология и экология*. № 3. 2019. С. 45–59.
19. Segura C., Caldwell P., Sun G., McNulty S., and Zhang Y.. A model to predict stream water temperature across the conterminous usa. *Hydrol. Process.*, 29:2178–2195, 2015. DOI: [doi:10.1002/hyp.10357](https://doi.org/10.1002/hyp.10357).
20. Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с.
21. Галущенко Н.Г. Гидрологические и водно-балансовые расчеты. Київ: Вища шк. Головное изд-во, 1987. 248 с.
22. Блага А.О., Шакирзанова Ж.Р. Просторово-часові узагальнення статистичних характеристик рядів мінімального меженного стоку річок Півдня України. *Наук.-прак. журн.: Екологічні науки*. 2025. № 59. С. 43–55. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.6>
23. Інформаційний портал Українського гідрометеорологічного центру Державної служби України з надзвичайних ситуацій. URL: <https://meteo.gov.ua> (дата звернення: 10.05.2026 р.).
24. Фізична географія Української РСР / за ред. А.М. Маринича. Київ : Вища школа, 1982. 208 с.
25. Атлас України : Кер. проекту Л.Г. Руденко, В.С. Чабанюк, А.І.Бочковська. Інститут географії Національної академії наук України і Товариство з обмеженою відповідальністю «Інтелектуальні системи ГЕО», Інтелектуальні Системи ГЕО, 1999–2000. URL: <http://www.isgeo.kiev.ua> (дата звернення: 18.04.2026)
26. Настанова з оперативної гідрології. Прогнози режиму вод суші. Гідрологічне забезпечення і обслуговування. Керівний документ. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2012. 120 с.
27. Оцінювання якості методики та точності (справджуваності) прогнозів режиму поверхневих вод суші / Керівний документ. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2015. 70 с.
28. Офіційний сайт Центральної геофізичної обсерваторії ім. Бориса Срезневського URL: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/index.php?fn=maps-ukraine&f=php&p=1> (дата звернення: 15.03.2026).
29. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2016–2020 рр. та весь період спостережень). Ч. 1. Річки. Вип. 1. Басейн Вісли, Дунаю, Дністра, Південного Бугу, річки Причорномор'я: Довідкове видання. Київ, 2023. 465 с.
30. Державний водний кадастр. Багаторічні дані про режим та ресурси поверхневих вод суші (за 2016–2020 рр. та весь період спостережень). Ч. 1. Річки. Вип. 2. Басейн Дніпра: довідкове видання. Київ, 2023. 294 с.

31. Guidelines on the Verification of Hydrological Forecasts. WMO-No. 1364. World Meteorological Organization, 2025 edition, 205 p. URL: <https://wmo.int/media/news/wmo-issues-guidelines-verification-of-hydrological-forecasts> (дата звернення: 15.12.2025).
32. Бойко В.М., Кульбіда М.І., Адаменко Т.І. Використання геоінформаційних технологій в оперативній гідрометеорології // *Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія*. 2010. Вип. 18. С. 25–30.
33. Шакирзанова Ж.Р. Довгострокові гідрологічні прогнози: конспект лекцій. Одеса: Вид-во ТЕС, 2010. 154 с. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/98>
34. Хільчевський В.К., Гребін В.В., Манукало В.О. Гідрологічний словник. Київ: ДІА, 2022. 236 с.
35. Гопченко Є.Д., Лобода Н.С., Овчарук В.А. Гідрологічні розрахунки: підручник. Одеськ. державний екологічний університет. Одеса: ТЕС. 2014. 484 с. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/6078>
36. Роз'яснення щодо порядку визначення допоміжного критерію оцінки маловоддя – екологічної витрати води. Український гідрометеорологічний центр ДСНС України (УкрГМЦ). Методичний лист від 18.12.2020 р. № 99001–1550/99024.
37. Гончарова Л.Д., Прокоф'єв О.М. Статистичний підхід до вирішення задач клімато-географічних особливостей розподілу опадів літнього сезону на території України. *Наук.-прак. жур.: Екологічні науки*. 2022. №1 (40). С. 134–139. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.24>
38. Прокоф'єв О.М., Гончарова Л.Д. Клімато-географічні особливості розподілу опадів на території України в осінній період. *Наук.-прак. жур.: Екологічні науки*. 2021. № 2 (35). С. 94–98. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9156>
39. Гончарова Л.Д., Прокоф'єв О.М., Решетченко С.І. Особливості клімато-географічного розподілу атмосферних опадів на півдні України. *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Сер.: Геологія. Географія. Екологія*. Вип. 57. 2022. С.81–94. URL: <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/21374/19946>
40. Шакирзанова Ж.Р., Блага А.О. Прогноз водності річок при дефіциті водних ресурсів на Півдні України. *Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «Кліматичні зміни та сталий розвиток сільського господарства»*, 19 вересня 2025 року, м. Одеса, Україна. Одеса: Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства НААН, 2025. С. 97–100. DOI: <https://www.doi.org/10.32782/19092025>
41. Кущенко Л.В., Блага А.О., Овчарук В.А., Шакирзанова Ж.Р. Умови формування та прогноз маловоддя на річках Півдня України в 2025 році. *Матеріали до 80-ої звітної наукової конференції професорсько- викладацького складу і наукових працівників ОНУ імені І. І. Мечникова*. (Одеса, 26–28 лист. 2025 р.) [Електронний ресурс]. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,7 МБ). – Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2025. С. 79–83.
- 06.06.1995 № 213/95-VR Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR), 1995, № 24, St. 79 iz zminamy, vnesenymy zghidno iz Zakonamy № 1641-VIII vid 04.10.2016, № 1054-IX vid 03.12.2020. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (Accessed: 20.01.2026) (in Ukr.)
3. Order № 1134-p of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 23 December 2022 On Approval of the Water Strategy of Ukraine until 2050 // Verkhovna Rada of Ukraine. 12.09.2022. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (Accessed: 27.03.2026) (in Ukr.)
4. Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational hydrology report (OHR). No. 50. WMO-No. 1029. 2008. 138 r. Available at: <https://library.wmo.int/records/item/32176-manual-on-low-flow-estimation-and-prediction> (Accessed: 07.02.2026)
5. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization/World Meteorological Organization (1992): International Glossary of Hydrology. Second edition, UNESCO, Paris.
6. Tallaksen, L.M. and H.A.J. van Lanen (eds) (2004): Hydrological Drought - Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Developments in Water Science, 48, Elsevier Science B.V., Amsterdam.
7. Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction WMO-No. 1274, 2021 edition, World Meteorological Organization, 2021. 72 p. Available at : <https://library.wmo.int/idurl/4/57915> (Accessed: 15.02.2026)
8. Polozhennia pro poriadok otsinky ta informuvannia pro malovoddia (hidrolohichnu posukhu) na vodnykh ob'ekтах sushi Ukrainy. Kyiv: Ukrainskyi hidrometeorologichnyi tsentr, 2020. 13 s. vvedeno v diiu nakazom UkrHMTs № 123 vid 14 hrudnia 2020 r. (in Ukr.)
9. Ovcharuk, V. A., Shakirzanovoi, Zh. R. (2024). Ekstremalni hidrolohichni yavyshta na richkakh Pivdnia Ukrainy: rozrakhunky i prohnozy [Extreme Hydrological Events on Rivers of Southern Ukraine: Assessment and Forecasting]. Odessa: ODEKU. Available at : <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13144/> (in Ukr.)
10. Shakirzanova, Zh.R., Ovcharuk, V.A., Dokus, A.O., Kushchenko, L.V., Tymko, O.S. (2022) Ymovirnisno-prohnostychnyi metod dlia vyznachennia mezhennykh vytrat vody richok Pivdennoho Buhu, Prychornomoria ta Nyzhnoho Dnipro. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu imeni V.N. Karazina, seria «Heolohiia. Heohrafiia. Ekolohiia». Vyp.57. Pp. 251-267. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-19> (in Ukr.)
11. Lindström, G. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. Journal of Hydrology 201(1-4):272-288. DOI: [10.1016/S0022-1694\(97\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00041-3)
12. Guo, J.; Zhang, F.; Li, W.; Yang, A.; Fan, Y.; Li, J. (2025). Runoff Prediction in the Xiangxi River Basin Under Climate Change: The Application of the HBV-XGBoost Coupled Model. Water , 17(16), 2420. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17162420>
13. Kriauciuniene, J., Jakimavicius, D., Sarauskiene, D. Estimation of uncertainty sources in the projections of Lithuanian river runoff / et al. Stoch Environ Res Risk Assess. 2013. 27. Pp. 769–784. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0608-7>.
14. Liu, T.; Si, Z.; Zhao, Y.; Wang, J.; Liu, Y.; Wang, L. (2025). Drought Propagation and Risk Assessment in the Naoli River Basin Based on the SWAT-PLUS Model and Copula Functions. Sustainability, 17, 8219. r.1-28. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17188219>

REFERENCES

1. Dyrektyva 2000/60/ІeS Yevropeiskoho Parlamentu i Rady «Pro vstanovlennia ramok diialnosti Spivtovarystva v haluzi vodnoi polityky» vid 23 zhovtnia 2000 roku. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text (Accessed: 20.01.2026) (in Ukr.)
2. Vodnyi kodeks Ukrainy. Kodeks Ukrainy, Zakon, Kodeks vid

15. Pedretti, D.; Camera, C.A.S.; Libera, N.D.; Pasini, S.; Gelmini, Y.; Braidot, A. (2025). *High-Resolution Flow and Nutrient Modeling Under Climate Change in the Flat, Urbanized and Intensively Cultivated Adige River Lowland Basin (Italy) Using SWAT*. Hydrology. 12, 239. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology12090239>
16. Nourani, V., Abbasi, H., Salehi, A.H. et al. (2026). *Reconstructing Hydrological Drought Using SWAT, Deep Learning Models, and SSI*. Water Resour Manage 40, 211. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04372-7>
17. Maragkaki, A.; Nerantzaki, S.D.; Jayyousi, A.; Halasah, S.; Albalawneh, A.; Hamdi, L.; Lilli, M.A.; Efstathiou, D.; Naimat, M.A.; Jaafreh, S.A.; et al. (2026). *Hydrological and Geochemical Modeling of Water Availability and Quality in the Jordan Valley Under Climate Change*. Water, 18, 721. DOI: <https://doi.org/10.3390/w18060721>
18. Nurbatsyna, A.A., Dydovets, Yu., Lobanova, A. (2019). *Adaptatsiya hidrolohicheskoi modeli SWIM dlia prohnozuvannya stoka ravnynnykh rek Kazakhstana vo vremia pavodkov/polovodia*. Hydrometeorologiya y ekolohiia. № 3. Pp. 45-59.
19. Segura, C., Caldwell, P., Sun G., McNulty, S., and Zhang, Y. (2015). *A model to predict stream water temperature across the conterminous usa*. Hydrol. Process. 29:2178–2195. DOI: [doi:10.1002/hyp.10357](https://doi.org/10.1002/hyp.10357)
20. Hrebin, V. V. (2010). *Suchasnyi vodnyi rezhym richok Ukrainy (landshaftno-hidrolohichniy analiz) [Modern water regime of Ukrainian rivers (landscape and hydrological analysis)]*. Kyiv: Nika-Centr Publ. Pp. 316. (in Ukr.)
21. Halushchenko N.H. (1987). *Hydrologicheskiye y vodno-balansovyye raschety [Hydrological and water balance calculations]*. Kyiv: Vyshcha shk. Holovnoe yzd-vo (in Rus.)
22. Blaha, A.O., Shakirzanova, Zh.R. (2025). *Prostorovochasovi uzahalnennia statystychnykh kharakterystyk riadiv minimalnogo mezhennoho stoku richok Pivdnia Ukrainy*. Nauk.-prak. zhur.: Ekolohichni nauky. № 59. Pp. 43-55. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.6> (in Ukr.)
23. *Informatsiyni portal Ukrainskoho hidrometeorologichnogo tsentru Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychaynykh sytuatsii*. Available at : <https://meteo.gov.ua> (Accessed: 10.05.2026).
24. *Fizychna heohrafiia Ukrainskoi RSR (1982) / za red. A.M. Marynychy*. Kyiv : Vyshcha shkola (in Ukr.)
25. *Atlas Ukrainy : Ker. proektu L.H. Rudenko, V.S. Chabaniuk, A.I.Bochkovska*. Instytut heohrafiy Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy i Tovarystvo z obmezhenoiu vidpovidalnistiu «Intelektualni systemy HEO», Intelektualni Systemy HEO, 1999-2000. URL: <http://www.isgeo.kiev.ua> (Accessed: 18.04.2026)
26. *Nastanova z operatyvnoi hidrolohii. Prohnozy rezhymu vod sushi. Hidrolohichne zabezpechennia i obsluhovuvannia. Kerivnyi dokument*. Kyiv: Ukrainskyi hidrometeorologichnyi tsentr, 2012. P. 120.
27. *Otsiniuvannia yakosti metodyky ta tochnosti (spravdzhuvanosti) prohnoziv rezhymu poverkhnivykh vod sushi / Kerivnyi dokument*. Kyiv: Ukrainskyi hidrometeorologichnyi tsentr, 2015. Pp. 70.
28. *Ofitsiyni sait Tsentralnoi heofizychnoi observatorii im. Borysa Sreznjevskoho*. Available at: <http://cgo-sreznjevskyi.kyiv.ua/index.php?fn=maps-ukraine&f=php&p=1> (Accessed: 15.03.2026).
29. *Derzhavnyi vodnyi kadastr. Bahatorichni dani pro rezhym ta resursy poverkhnivykh vod sushi (za 2016-2020 rr. ta ves period sposterezhen)*. Ch. 1. Richky. Vyp. 1. Basein Visly, Dunaiu, Dnistra, Pivdennoho Buhu, richky Prychornomoria: Dovidkovye vydannia. Kyiv, 2023. P. 465.
30. *Derzhavnyi vodnyi kadastr. Bahatorichni dani pro rezhym ta resursy poverkhnivykh vod sushi (za 2016-2020 rr. ta ves period sposterezhen)*. Ch. 1. Richky. Vyp. 2. Basein Dnipra: dovidkovye vydannia. Kyiv, 2023. Pp. 294 .
31. *Guidelines on the Verification of Hydrological Forecasts*. WMO-No. 1364. World Meteorological Organization, 2025 edition, 205 p. Available at : <https://wmo.int/media/news/wmo-issues-guidelines-verification-of-hydrological-forecasts> (Accessed: 15.12.2025).
32. Boiko, V.M., Kulbida, M.I., Adamenko, T.I. (2010). *Vykorystannia heoinformatsiynykh tekhnolohii v operatyvnyi hidrometeorolohii*. Hidrolohiia, hidrokhimiia, hidroekolohiia. Vyp. 18. Pp. 25-30. (in Ukr.)
33. Shakirzanova, Zh.R. (2010) *Dovhostrokovyi hidrolohichniy prohnozy [Long-term hydrological forecasts]: konspekt leksii*. Odesa: Vyd-vo TES. Available at: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/98> (in Ukr.)
34. Khilchevskiy, V.K., Hrebin, V.V., Manukalo, V.O. (2022). *Hidrolohichniy slovnyk [Hydrological dictionary]*. Kyiv: DIA, P. 236 . (in Ukr.)
35. Hopchenko, Ye. D., Loboda, N. S., & Ovcharuk, V. A.(2014). *Hidrolohichni rozrakhunky [Hydrological calculations]*. Odesa: TES. Available at: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/6078> (in Ukr.)
36. *Roziasnennia shchodo poriadku vyznachennia dopomizhnogo kryteriiu otsinky malovoddia – ekolohichnoi vytraty vody. Ukrainskyi hidrometeorologichnyi tsentr DSNS Ukrainy (UkrHMTs)*. Metodychnyi lyst vid 18.12.2020. № 99001-1550/99024. (in Ukr.)
37. Honcharova, L.D., Prokofiev, O.M. (2022). *Statystychni pidkhdid do vyrishennia zadach klimato-heohrafichnykh osoblyvosti rozpodilu opadiv litnogo sezonu na terytorii Ukrainy*. Nauk.-prak. zhur.: Ekolohichni nauky. №1 (40). S. 134-139. Available at: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.24> (in Ukr.)
38. Prokofiev, O.M., Honcharova, L.D. *Klimato-heohrafichni osoblyvosti rozpodilu opadiv na terytorii Ukrainy v osinni period*. Nauk.-prak. zhur.: Ekolohichni nauky. 2021. № 2 (35). S. 94-98. Available at: <http://eprints.library.odetu.edu.ua/id/eprint/9156> (in Ukr.)
39. Honcharova, L.D., Prokofiev, O.M., Reshetchenko S.I. (2022). *Osoblyvosti klimato-heohrafichnogo rozpodilu atmosfernykh opadiv na pivdni Ukrainy*. Visnyk KhNU im. V.N. Karazina. Ser.: Heolohiia. Heohrafiia. Ekolohiia. Vyp. 57. Pp. 81-94. Available at: <https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/21374/19946> (in Ukr.)
40. Shakirzanova, Zh.R., Blaha, A.O. (2025). *Prohnoz vodnosti richok pry defitsyti vodnykh resursiv na Pivdni Ukrainy*. Zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovy–praktychnoi konferentsii «Klimatichni zminy ta stalnyi rozvytok silskoho hospodarstva», 19 veresnia 2025 roku, m. Odesa, Ukraina. Odesa: Instytut klimatichno oriietovanoho silskoho hospodarstva NAAN. Pp. 97-100. DOI: <https://www.doi.org/10.32782/19092025> (in Ukr.)
41. Kushchenko, L.V., Blaha, A.O., Ovcharuk, V.A., Shakirzanova, Zh.R. (2025). *Umovy formuvannia ta prohnoz malovoddia na richkakh Pivdnia Ukrainy v 2025 rotsi*. Materialy do 80-oi zvitnoi naukovo konferentsii profesorsko- vykladatskoho skladu i naukovykh pratsivnykiv ONU imeni I. I. Mechnykova. (Odesa, 26–28 lyst. 2025 r.) [Elektronnyi resurs]. – Elektronni tekstovi dani (1 fail: 14,7 MB). Odesa: Odes. nats. un-t im. I. I. Mechnykova. Pp. 79-83. (in Ukr.)

UDC 556.16.06:556.535.4/.5(477)

THE TERRITORIAL METHOD OF FORECASTING THE LOW-FLOW DISCHARGE AND ASSESSMENT OF STREAMFLOW DEFICIT OCCASION OF SOUTHERN UKRAINE RIVERS

Zh. R. Shakirzanova, A. O. Blaha

Odesa I.I. Mechnikov National University
2 V. Zmienka Str., 65000, Odesa, Ukraine
jannetodessa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0600-5657>

The paper investigates the features of low-flow discharge formation in the rivers of Southern Ukraine under current climate change conditions. It examines a territorial method for short-term forecasting of low-flow discharges and substantiates approaches to the spatial assessment of streamflow deficit and its probability of occurrence during the contemporary river water-bearing period. The relevance of the study is driven by the escalating water resource scarcity, the increasing frequency of hydrological droughts, and the urgent need for operational low-flow forecasting to ensure effective water resource management in the region.

The objective of the study is to improve the territorial method for forecasting mean decade (10-day) water discharges during the summer-autumn and winter low-flow periods (by extending the hydrological observation series, refining seasonal territorial relationships, and extending the temporal boundaries of the summer hydrological season), as well as to develop approaches for the spatial assessment of streamflow deficit and its probability of occurrence in the rivers of Southern Ukraine.

It is established that under current climate change conditions in Southern Ukraine, there is a downward trend in river low-flow discharge, which is associated with rising air temperatures and shifts in atmospheric precipitation patterns. This leads to an intensification of water resource scarcity and an increased risk of hydrological drought development.

The study utilizes long-term observation series of water discharges in the river basins of the Southern Bug, Lower Dnieper, and rivers of the North-Western Black Sea region for the period 1980–2020 when improving the forecasting methodology and in the period until 2025 – to test the methodology on independent data. The forecast method used is based on calculating the characteristics of water runoff depletion during the low water period in the form of regional relationships between initial and forecast runoff modules, statistical evaluation of the forecasting technique, and cartographic analysis of the spatial distribution of forecast characteristics were performed. To evaluate the probability of streamflow deficit occurrence, empirical curves of low-flow discharge probability of exceedance were constructed.

The findings indicate that the territorial method ensures satisfactory quality of short-term forecasts for mean decade water discharges, with a quality criterion ratio of $S/\sigma = 0,71\text{--}0,82$ and an admissible error confidence level of 74–87%. The continuation of the low-flow runoff phase in the contemporary climatic period has been detected, particularly for the rivers of the North-Western Black Sea region, where the drying up of small watercourses is observed in certain seasons. Spatial analysis of forecast runoff modules and their probability of exceedance allowed for the identification of areas at the highest risk of hydrological drought development.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of their application in the operations of hydrometeorological and water management organizations, water use planning, assessment of the ecological status of river basins, and the development of climate change adaptation measures.

Keywords: low-flow discharge, climate change, water supply, water deficit, forecasting, territorial method, streamflow deficit assessment, low-flow criteria, low-flow probability.

Подання до редакції : 18. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 13. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026