

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.1.288190>

УДК 556.16.047:556.168

E-mail: shevch62@gmail.com;
sasha.lobodzinsky@gmail.com;
chornomorets_u@ukr.net;
vlkshkl@ukr.net; nasedkin12@ukr.net

*Corresponding author /
Автор для кореспонденції:
O.L. Shevchenko, shevch62@gmail.com

Received / Надійшла до редакції:
28.09.2023

Received in revised form /
Надійшла у ревізованій формі:
02.01.2024

Accepted / Прийнята:
26.01.2024

Keywords: hydrograph; groundwater;
river recharge; subsurface flow;
correction; hydrodynamic methods;
flood.

Ключові слова: гідрограф; ґрунтові
води; живлення річок; підземний стік;
гідродинамічні методи; водопілля.

Розчленування гідрографів річок з урахуванням даних гідрогеологічних спостережень

О.Л. Шевченко^{1*}, О.В. Лободзінський¹, І.Ю. Наседкін², Ю.О. Чорноморець¹, В.В. Шкляренко¹

¹Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ, Україна;

²Національний університет «Чернігівський колегіум» ім. Т.Г. Шевченка, Чернігів, Україна

Decomposition of river hydrographs taking into account data of hydrogeological observations

O.L. Shevchenko^{1*}, O.V. Lobodzinskyi¹, I.Yu. Nasedkin², Yu.O. Chornomorets¹, V.V. Shkliarenko¹

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine; ²Natsional'nyi Universytet, "Chernihiv's'kye Kolehium" im. T.H. Shevchenka, Chernihiv, Ukraine

In the case of absence of reliable information on fluctuations of levels and hydraulic parameters of aquifers within a large catchment, the method of river hydrograph decomposition can be used to assess groundwater component and other constituents of river water recharge. The difficulties and shortcomings of this method, which relies on specific schematizations and assumptions, are analysed and discussed. We propose to take into account the results of calculations of lateral groundwater inflow to the river accomplished using the numerical method based on observations at representative balance sites in order to improve the accuracy of the method of decomposition of the river hydrograph. A proper schematization should also be justified for river catchment (or its part), which describes the interaction of surface water, shallow groundwater, and artesian (deep) interlayer waters, which provides rationale for defining or neglecting groundwater inflow to river during the flood periods. The most disputable issue remains the allocation of the phase of "reverse water inflow to river banks" during flood periods. The groundwater level rise at the beginning of the flood results from the infiltration recharge to the aquifer and from inflow of water from the river. The contribution of inflow to river bank to groundwater level rise is dependent from the distance from the river to the observation well. To establish hydraulic head gradient from the river towards the adjacent groundwater aquifer at flood peak, at least two observation wells are needed, one of which should be located 3–4 m from the river water edge on the elevated part of the bank which is not flooded, and the other should be located 50–70 m from the bank towards the watershed. It is proposed that the phase of maximum groundwater inflow to the river should be adjusted based on the dates of the beginning and ending of the groundwater level decrease during the recession of the river flow during the flood period. The combined application of the described above methods showed that the use of only hydrograph decomposition method underestimates the share of groundwater recharge to the river by 2–5%. Based on the analysis of the Pivdennyi Buh River hydrographs during the 1980–2020 period, general tendencies of changes in the shallow groundwater and deep subsurface recharge of the Pivdennyi Buh River in its upper basin (upstream of the city of Khmilnyk) have been established: deep subsurface recharge prevailed over the shallow groundwater component (33.4 compared to 25.0% of the total). At the same time, the total subsurface runoff constituted on average 58%.

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Ц и т у в а н н я : Шевченко О.Л., Лободзінський О.В., Наседкін І.Ю., Чорноморець Ю.О., Шкляренко В.В. Розчленування гідрографів річок з урахуванням даних гідрогеологічних спостережень. *Геологічний журнал*. 2024. № 1 (386). С. 32–46. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.1.288190>

С і т а і о н : Shevchenko O.L., Lobodzinskyi O.V., Nasedkin I.Yu., Chornomorets Yu.O., Shkliarenko V.V. 2024. Decomposition of river hydrographs taking into account data of hydrogeological observations. *Geologichnij žurnal*, 1 (386): 32–46. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.1.288190>

Вступ

В умовах потепління клімату та метеорологічної посухи на брак опадів передусім реагують відкриті водні об'єкти. За відсутності регулювання стоку стійкість річок до гідрологічної посухи визначається часткою підземного живлення в загальному стоці: чим більша така частка, тим більш рівномірними протягом маловодних періодів року будуть витрати річки. Найбільш дискусійним залишається питання розподілу складових річкового стоку у багатоводні періоди. Для виділення і кількісної оцінки цих складових застосовують методи: балансовий, гідродинамічний, гідрохімічний, з використанням природних ізотопів, моделювання та розчленування гідрографів річок. Найбільш сучасними і доскональними вважаються методи моделювання. Проте за надто розрідженої мережі моніторингових свердловин в Україні, відсутності систематичних спостережень та недоступності достовірних даних виконати оцінку частки та обсягів підземного стоку до річок сучасними методами моделювання подекуди неможливо, особливо для великих водозборів.

Різноманітні просторові математичні моделі (Thompson et al., 2004, 2023; Dai et al., 2010; Rahman et al., 2016; Chan et al., 2020) дозволяють відстежувати інтегровані гідрологічні реакції водозбірного басейну на погодно-кліматичні чинники, кількісно оцінювати витрати підземного стоку та баланс водоносного горизонту. Наприклад, фізична модель MIKESHE моделює і розраховує гідрологічний баланс водозбірного басейну. Проте в Україні ключовою проблемою є забезпечення такої та подібних їй моделей вхідними даними. Як концептуальні «зовнішні» (типу MOBIDIC, MODFLOW, SWAT), так і фізичні моделі мають невизначеності, потребують схематизації і призначення розрахункових параметрів (які не завжди можна обґрунтувати або перевірити розв'язанням обернених задач), що призводить до неточностей у результатах. Так, за даними (Bizhanimanzar et al., 2020), спрощена концептуалізація ненасиченого потоку в об'єднаній моделі MOBIDIC-MODFLOW призвела до переоцінки поповнення ґрунтових вод навесні та недооцінки влітку.

В Україні для визначення складових річкового стоку з усієї площі водозбору, за відсутності достовірної інформації про коливання рівнів підземних вод та фільтраційні параметри водоносних горизонтів, практично безальтернативним

залишається метод розчленування гідрографів річок. Проте, незважаючи на тривалу історію, щодо його застосування досі відсутні єдині вимоги або хоча б чітка диференціація підходів до розчленування гідрографів за геолого-гідрологічними умовами, характером водообміну, порядком річки тощо. Звідси, кожен з дослідників сам обирає певні передумови (тісний взаємозв'язок або однобічний приплив ґрунтових вод), що дозволяють використати одну з багатьох спрощених схем розчленування. Доволі логічним виглядає підхід до розчленування гідрографів, виходячи з типу взаємодії ґрунтових вод з річкою, що обумовлюється геологічною будовою та глибиною ерозії (Лучшева, 1976). Однак для гідрометричних створів України не виконано подібної типізації, у зв'язку із чим на практиці оперують різноманітними припущеннями.

Апріорі підземний стік до незарегульованої рівнинної річки хоча і не однаковий, проте майже повсюдний за її довжиною, а на окремих ділянках (наприклад, у витоках) також і відносно постійний, проте він не має чітко виражених ознак на гідрографах. За (Куделін, 1960; Лучшева, 1976), в трьох варіантах схем розчленування з чотирьох допускається безперервне живлення річок з перших від поверхні безнапірних горизонтів, що повністю прорізаються річкою; при цьому рівень води в річці за будь-яких умов нижчий, ніж рівень ґрунтових вод (РГВ). За більшістю ж відомих схем розчленування гідрографів річок, що мають тісний взаємозв'язок з першим від поверхні водоносним горизонтом і впливають на його режим (Snyder, 1939; Огиевский, 1952; Попов, 1968; Соколовский, 1968), вважається, що приплив ґрунтових вод повністю припиняється під час високої повені або паводку.

Натомість, застосування методів моделювання дозволило встановити участь ґрунтових вод у максимальному стоці річки. Завдяки вивченню берегового припливу ґрунтових вод до річки Upper Klamath в Орегоні (США) із високою просторово-часовою дискретністю (по свердловинах) та за допомогою об'єднаної моделі SWAT-MODFLOW вдалось встановити значну просторову варіабельність стоку, і лише в кількох місцях взаємодія ґрунтових і поверхневих вод не спостерігалась (Bailey et al., 2016). Широко відоме явище розвантаження субмаринних джерел та великих потоків підземних вод із значної глибини (40–100 м) у моря. Воно відбувається лише тому, що зона поглинання та формування

напору підземних вод розташована гіпсометрично вище, ніж рівень моря. Так само має бути й з річками, базис яких не досягає водотриву, а рівень, навіть у фазу максимального підйому, залишається нижчим за РГВ в області формування напору (на вододілах) та на більшій частині водозбору (можливо, крім заплави). Тобто, безперечно, формується підпір потоку ґрунтових вод до річки від берегів, проте, скоріш за все, залишається руслове висхідне розвантаження не лише напірних міжпластових, а й ґрунтових вод до малих річок та верхніх частин великих річок, що не прорізають місцевий водотрив. Так, для рівнинної річки в Індонезії за допомогою комбінованого моделювання SWAT-MODFLOW показано, що внесок підземних вод у місячну пікову витрату річки під час водопілля становить від 0,24 до 5,27 %, за середнього внеску за період 2015–2022 рр. (8 пікових місяців) 2,48 % (Palupi et al., 2023). Хоча насправді це не доводить, що можливі дні з відсутнім або «від'ємним» припливом.

Недоліком існуючих схем розчленування гідрографів є також подекуди необґрунтоване нехтування глибоким підземним живленням річок, спираючись лише на відомості про існування водотриву під руслом річки. Так, згідно з вже згадуваною типізацією (Лучшева, 1976), також у трьох випадках з чотирьох допускається повна відсутність глибокого напірного живлення річок.

Участь глибоких підземних вод у живленні річки відображають доволі спрощено: шляхом відсікання «підшови» гідрографа прямою горизонтальною лінією, дотичною до мінімального значення витрат водотоку за рік. При цьому глибоке підземне живлення розглядається як квазістаціонарний процес, який можливий лише за умов водного потоку, що встановився (Лободзінський, Данько, 2023). Проте глибоке підземне живлення – процес неоднорідний і нестійкий, що зумовлено особливостями вертикального водообміну між водоносними горизонтами, які мають гідравлічний зв'язок із поверхневими водами. Інтенсивність і напрямки водообміну залежать від тисків у водомістких шарах і співвідношення п'єзометричних рівнів, що змінюються у часі відповідно до змін гідродинамічних умов в основних областях живлення. То чому ж тоді порушується цей принцип під час оцінки висхідного перетікання підземних вод за значних змін рівнів поверхневих вод (за відносної сталості

п'єзометричних рівнів), які можуть призводити до інверсії напорів та зміни напрямку потоку? Враховуючи це, глибоке підземне живлення на гідрографі при його розчленуванні варто також розглядати як динамічну характеристику, що, незважаючи на певну інерційність, має власну внутрішньорічну та багаторічну мінливість.

Що стосується поняття «зворотне живлення ґрунтових вод», то воно не є характерним для рівнинних річок зони помірного клімату, де їх долини являють собою зони розвантаження підземних вод, складені «не надто проникними» піщано-глинистими відкладами. За відомих усереднених значень коефіцієнтів фільтрації алювіальних піщаних відкладів 20–30 м/добу (Отчет..., 1986; Панасюк, 2014; Стрельцов, Шевченко, 2022) можна легко встановити, що для того, щоб поверхневі води з річки поширились у водоносний горизонт на 100 м від річки за градієнта 0,02, потрібно, щоб період водопілля тривав 170–250 діб. Оскільки гідрологічні фази, що забезпечують такі достатньо високі градієнти тривають не більше двох-трьох тижнів, вочевидь, що вода з річки може поширитись в борти на відстань лише близько 10 м. Винятком є ділянки тривалих підпорів при зарегулюванні річкового стоку; річки, що живляться з постійних джерел (озер, льодовиків), іригаційні мережі, штучні антирічки (вздовж водосховищ) або гірські річки, де алювіальні відклади складені високопористими гравійно-гальковими та валунними відкладами з коефіцієнтами фільтрації понад 100 м/добу, а також річки, що протікають у тріщинуватих скельних породах та породах, які карстуються. За таких умов, дійсно, фільтраційні втрати з відкритих джерел є істотним джерелом живлення підземних вод. За інших умов доцільно казати про підпір потоку ґрунтових вод до річки або бічне регулювання припливу.

Мета роботи – розробка і тестування (на прикладі даних для р. Південний Буг) методики оцінки підземного живлення річок на основі комбінування методу розчленування гідрографа і чисельного методу, а також перевірка на цій основі положень та припущень (зокрема, стосовно припливу ґрунтових вод на час повені), що зазвичай використовуються при застосуванні методу розчленування гідрографів річок.

Для досягнення цієї мети нами спочатку розглянуто суперечності методу розчленування гідрографів, далі – можливі шляхи покращення

його точності. Запропоновано проводити зіставлення та коригування результатів розчленування гідрографів за графіками РГВ та питомого стоку ґрунтових вод до річки, отриманими за розрахунками стоку чисельним методом.

Матеріали і методи

У даному дослідженні для однакових об'єктів було застосовано два методи визначення підземного стоку: розчленування гідрографів стоку річок та гідродинамічний чисельний метод за даними спостережень за РГВ по свердловинах. Розчленування гідрографів цілком базувалося на гідрологічному підході (Гребінь, Василенко, 2010), тобто величина підземного живлення визначалась лише на підставі аналізу значень щоденних витрат води в річці, даних про дощові та снігові опади і температуру. На першому етапі розчленування визначалась частка глибокого підземного живлення шляхом проведення прямої горизонтальної лінії через точки, які відповідають мінімальному значенню витрати води за конкретний рік. При цьому її числове значення обчислювалось за площею фігури. Далі на гідрографі позначалися нижні переломні точки початку й закінчення періодів більш чи менш різкого збільшення витрат води під час паводків. За Б.В. Поляковим (1946), під час весняного водопілля ґрунтове живлення зменшується до дати піку водопілля, а потім починає збільшуватися до дати його закінчення, тому на кожному графіку відмічалися зазначені дати для визначення межі ґрунтового живлення. Через зазначені точки проведено відрізки ламаної лінії, що врешті відділила поверхневе (вище лінії) та ґрунтове живлення річки (між даною лінією та горизонтальною лінією глибокого підземного живлення). Якщо під час весняного водопілля виділялись піки, спричинені рідкими опадами, то вони також були зрізані плавними лініями, а отримані площі додавались до значення дощового живлення. Для визначення числових значень кожного окремого типу живлення використано комп'ютерне програмне забезпечення з відкритою ліцензією Graph (Graph..., 2024). На його основі здійснено розрахунки окремих площ фігур, що відповідають тим чи іншим типам живлення.

Очевидно, що більш коректним є розчленування гідрографа при врахуванні режиму як поверхневих, так і підземних вод. Для цього повинна існувати мережа спряжених гідрометрич-

них постів та гідрогеологічних кузових створів не лише на ґрунті, а й на глибокі напірні води зони інтенсивного водообміну. Повинна витримуватись синхронність у спостереженнях за режимом поверхневих і підземних вод.

Щоб забезпечити коректність та обґрунтованість розчленування гідрографа, варто використовувати не лише метеорологічні показники, а й наявні дані спостережень за рівнями підземних і ґрунтових вод та розрахункові значення надходження їх до річки, отримані шляхом розв'язання скінченнорізницьових рівнянь або застосування методів гідродинамічного моделювання.

Гідродинамічний метод (Водообмен..., 1988; Шестаков, 2009) дозволяє кількісно визначити підземний приплив до річки за схемою неусталеної геофільтрації лінійного в плані однорізного потоку, проте не дає чіткого уявлення про частку підземного стоку в загальному. Тим не менш, з його допомогою можна встановити дійсні часові інтервали припливу ґрунтових вод до річки або підпору ґрунтового стоку. Витрати ґрунтового стоку на одиницю довжини берега річки визначались з добовою дискретністю за чисельним рівнянням:

$$q_t = k_t^{cep} \times h_t^{cep} \times l_t \pm \frac{(\Delta H_t \times l_t \times \mu_t)}{2}, \quad (1)$$

де q_t – витрати ґрунтового потоку на момент часу t в перерізі урізу русла, м²/добу; k_t^{cep} – середній коефіцієнт фільтрації ґрунтів, м/добу; h_t – потужність потоку ґрунтових вод як середньоарифметичне від висоти рівня води в руслі та у розрахунковій свердловині над першим від поверхні водотривом на початковий момент вимірювань, м; l_t – гідравлічний ухил (градієнт потоку); l_t – відстань від урізу води в річці до осі спостережної свердловини, м; ΔH_t – абсолютна величина позитивного або від'ємного приросту РГВ за одиницю часу, м/добу; μ_t – величина водовіддачі або браку насичення ґрунту в зоні коливання РГВ. Якщо другий член рівняння має позитивний знак, то результуюча величина витрат характеризує одиночні бокові витрати ґрунтових вод при осушенні горизонту, якщо мінус – підпір і наповнення горизонту від річки. Такий підхід до розрахунків добре кореспондується із принципами розчленування гідрографа річки: при збільшенні рівнів та витрат води в річці бічний приплив ґрунтових вод знижується і навпаки.

Поряд з бічним стоком у ході балансових розрахунків оцінювалося інфільтраційне живлення. Його значення порівнювалися з відомими з літератури зональними значеннями інфільтрації. Наприклад, для Вінницької області (верхня та середня частини басейну р. Південний Буг) величина інфільтраційного живлення, вирахована за даними багаторічних спостережень (до 1998 р.), за балансом хлор-іона становить 30–50 мм/рік (Ситников, 2010). За нашими остаточними розрахунками для верхньої частини цього басейну середнє інфільтраційне живлення на ділянках із середньобагаторічним РГВ 3,6 м склало 21 мм/рік (за 1980–1998 рр.), що можна вважати прийнятним. Отже, параметри k_t^{cep} та μ_t в ході розрахунку ітераційним чином уточнювали, поки середні багаторічні значення інфільтрації не стали відповідати таким для даного району. Для малих річок, таких як Згар і Соб, верифікація розрахованих значень підземного припливу та використаних для цього параметрів була виконана також шляхом зіставлення із значеннями частки підземного стоку до річки, отриманими з розчленування її гідрографа за окремий рік. Також для уточнення значень коефіцієнта фільтрації та водовіддачі порівнювалися розраховані значення припливу ґрунтових вод до річки та відомі значення річкового стоку в періоди літньої межени за відсутності атмосферних опадів. Оскільки головною метою розрахунків ґрунтового стоку було отримання не так точних його значень, як щодобової динаміки з коливаннями припливу та інтервалами підпору, то описаний вище метод оцінки фільтраційних параметрів можна вважати цілком прийнятним.

Виконавши розрахунки за рівнянням (1) для всіх характерних фаз рівневого режиму, можна побудувати гідрограф ґрунтового стоку на одиницю довжини берега річки. Для всієї довжини водотоку величина сумарних витрат ґрунтового стоку вираховується за формулою:

$$Q_t = \sum_{i=1}^{i=n} q_{t,i} L_i, \quad (2)$$

$q_{t,i}$ – одиничні витрати по окремих пунктах, що поширюються на аналогічні за гідрогеологічними умовами ділянки прибережної зони довжиною L_i .

Саме це значення (Q_t) можна порівнювати із точковими (добовими) значеннями виділеної на гідрографі складової стоку ґрунтових вод

та сумарним річним стоком. За наявності лише одного розрахункового створу значення стоку ґрунтових вод, визначені обома методами, будуть порівнянні, якщо водозбір річки невеликий і вздовж всієї довжини річки витримуються однорідні геофільтраційні та гідродинамічні умови. Якщо ж умови вздовж потоку неоднорідні, то прилеглу площу водозбору розбивають на однорідні відрізки, для кожного з яких обладнують створ з водомірної рейки та свердловин з обох боків водотоку. Це забезпечило високу точність результатів у роботі (Bailey et al., 2016). Варто враховувати також, що розрахунки по створах свердловин, розміщених надто близько до рівнинної річки (до 40 м), будуть давати занижені значення внаслідок частих підпорів РГВ, а розрахунки по дуже віддалених свердловинах (понад 150 м) можуть демонструвати завищені результати у зв'язку із постійним перевищенням РГВ над рівнем річки.

Для встановлення наближених обсягів напірного підземного живлення річки можна скористатись формулою С.Ф. Авер'янова, для застосування якої необхідно знати абсолютні відмітки рівнів ґрунтових та напірних вод:

$$Q_{висх} = \frac{\pi \times K_{\phi} (H' - H_p)}{\ln \frac{16z}{\pi (B + \Delta h)}}, \quad (3)$$

де $Q_{висх}$ – висхідний приплив напірних вод у річку на одиницю її довжини; K_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації водотривкого шару, через який йде перетікання напірних вод у русло річки; z – товщина цього шару; B – ширина річки по урізу води; H' та H_p – п'єзометричний рівень та рівень води в річці в абсолютних значеннях; Δh – середнє перевищення РГВ у свердловині над рівнем води в річці.

Експериментальна ділянка

Для апробації запропонованого підходу було виконано розрахунки питомого припливу ґрунтових вод до р. Південний Буг у районі м. Хмільник (рис. 1) гідродинамічним методом та виділено складові загального стоку річки методом розчленування гідрографа стоку за даними по найближчому гідропосту «Лелітка». Балансова ділянка розташована в межах західної частини Українського масиву тріщинних вод. Схематизований розріз наведено на рис. 2, а повний гідрогеологічний розріз – у попередній роботі (Шевченко та ін., 2021).



Рис. 1. Регіональна схема басейну р. Південний Буг (а) та локальна схема розташування спостережних свердловин на першій від поверхні водоносній горизонт (св. 5-3 і 5-5) та водоносній горизонт у тріщинуватих кристалічних породах (св. 5-2) на території експериментального створу в м. Хмельник (б)

Fig. 1. Regional scheme of the Pivdennyi Buh River basin (a) and layout of observation wells on the first aquifer (well 5-3 and 5-5) and an aquifer in fractured crystalline rocks (well 5-2) at the experimental site in Khmilnyk city (b)

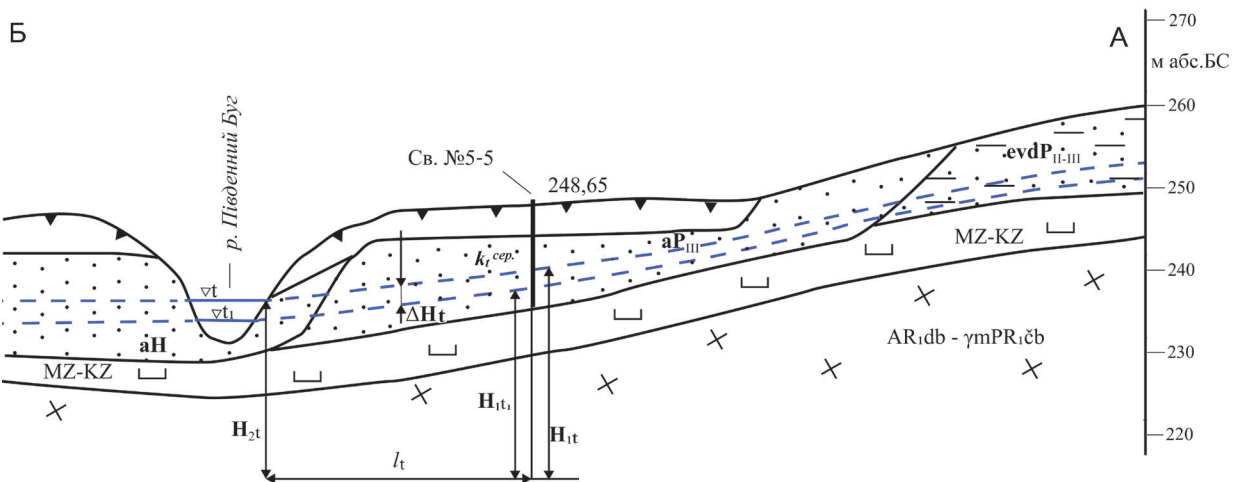


Рис. 2. Схематизований гідрогеологічний розріз по лінії А-Б (див. рис. 1) розміщення св. 5-5 на території м. Хмельник, на лівобережній частині водозбору р. Південний Буг

Fig. 2. Schematic hydrogeological cross-section of the well 5-5 location along the A-B (see Fig. 1) line in Khmilnyk, on the left bank of the Pivdennyi Buh River

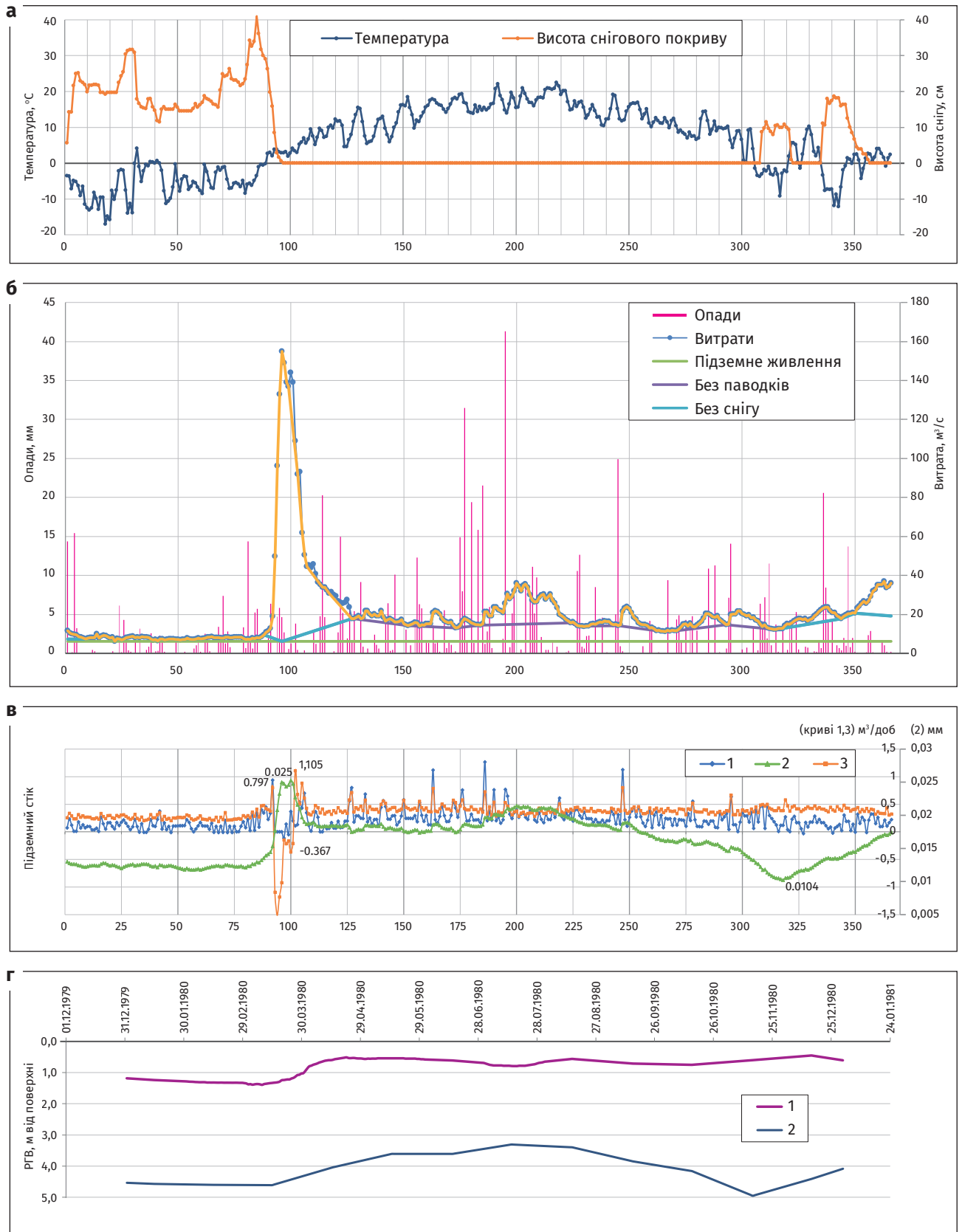


Рис. 3. Розчленування гідрографа р. Південний Буг за 1980 р. (гідропост «Лелітка») та кількість атмосферних опадів (б) поряд з хронологічними графіками: а – температури приземного повітря та висоти снігового покриву; в – питомого підземного стоку в створі м. Хмільник: 1 – в 68 м від річки (по св. 5-5), м³/добу/м пог; 2 – в 96 м від річки (між св. 5-5 і віртуальною свердловиною за умови синхронності змін РГВ), мм; 3 – 42 м від річки (св. 5-3), м³/добу/м пог; 2 – коливання РГВ у свердловинах: 1 – св. 5-3, 2 – св. 5-5

Fig. 3. Separation of the hydrograph of the Pivdennyi Buh River in 1980 based on the data of discharge measurements at the hydrological gauge «Lelitka» in comparison with the amount of precipitation (б), as well as time series: а – dynamics of surface air temperature and snow cover height; в – specific underground runoff in the Khmilnyk section: 1 – 68 m from the river (along well 5-5), m³/day/m; 2 – 96 m from the river (between well 5-5 and the virtual well, provided that the changes in the hydraulic conductivity are synchronized), mm; 3 – 42 m from the river (borehole well 5-3), m³/day/m; 2 – fluctuations in groundwater levels in wells: 1 – well 5-3, 2 – well 5-5

Абсолютні відмітки РГВ визначались за даними спостережень по свердловинах державної моніторингової мережі, наданими ДНВП «Геоінформ України», регіональними гідрогеологічними партіями та спеціалізованими підприємствами. Геологічні розрізи також встановлено за описами спостережних свердловин та даними звітів з геолого-економічної оцінки. Дані про рівні води в річках отримано в ЦГО ім. Б.І. Срезневського. За фактичного неспівпадіння гідрометричного та гідрогеологічного створів перший «переносився» з поправкою відповідно до градієнта потоку річки.

За формулою (1) було визначено приплив підземних вод до р. Південний Буг (Шевченко та ін., 2021), що відображений лініями 1 і 3 на рис. 3, в.

Для уточнення динаміки припливу ґрунтових вод до річки впродовж року рекомендується аналізувати не лише характер опадів і температури, а й порівнювати зміни РГВ на різній віддалі від річки та значення підземного стоку, визначені чисельними методами (див. рис. 3). На рис. 3, б наведено результати розчленування гідрографа р. Південний Буг за 1980 р. традиційним методом – з урахуванням характеру опадів, температури повітря, дати її переходу до стійких позитивних значень, опадів теплого періоду тощо. Видно, що за менших градієнтів, але вищих РГВ на спаді весняного водопілля приплив ґрунтових вод до річки більший, ніж влітку. Проте, по-перше, піки весняних витрат нетривали; по-друге, на весну припадає також фаза підпору РГВ, коли приплив ґрунтових вод до річки зупиняється. Внаслідок цього максимальне сезонне живлення річок найчастіше припадає на літо (рис. 4). За розрахунками стоку ґрунтових вод гідродинамічним методом з'ясовано, що у 1980 р. переважав весняний сумарний стік (див. рис. 4), у зв'язку з чим варто внести певні корективи при виділенні лінії, що відділяє витрати ґрунтових вод на рис. 3, б. У випадку із 1980 р. графіки витрат річкового стоку та підземного стоку (див. рис. 3, в, лінія 2) досить схожі, крім хіба що замикаючого періоду після 260 доби. До початку водопілля (91 доба) на всіх графіках (див. рис. 3, б, в) стік ґрунтових вод відносно рівномірний та стабільний. Витрати ґрунтових вод реагують на перехід температур до позитивних (90 доба) вже на другу добу (92 доба), в інші роки – здебільшого на 4–5 добу. Проте після цього у зв'язку з підпором від річки ґрунтовий стік до неї припиняється на відстань

до 40–45 м, хоча продовжується на більшій відстані (див. рис. 3, в, лінія 2). За цим графіком підземний стік на віддалі 96 м від річки поступово зростає з 90 до 101 доби; при цьому максимум витрат та рівнів у річці припадає на 96 добу, після чого вони доволі різко зменшуються. На 102 добу «включається» підземний стік до річки на відстані 42 м від неї, швидко досягаючи максимуму. Тобто період підпору та від'ємного живлення ґрунтових вод був коротким – до 8 діб (93–101 доба). На відстані близько 80 м від річки РГВ стає вищим за рівень в річці більш ніж на 1 м. За швидкого зниження рівня води в річці градієнт стрімко зростає від від'ємного на 10.04.1980 р. (101 доба) до +0,019 на 30.04.1980 р., набуваючи позитивних значень з 11 квітня, коли підземний стік був максимальним (див. рис. 3, в, лінія 3). Отже, в ситуації, коли пік поєнє є нетривалим, як у 1980 р., відразу після падіння рівня води в річці швидко спрацьовується прибережний купол підпору ґрунтових вод, заповнений значною мірою річковою водою. За відсутності дощів рівень в річці продовжує спадати і стік ґрунтових вод після спрацювання прибережного купола не припиняється. Саме період від початку до припинення зниження РГВ відповідатиме максимальному за рік припливу ґрунтових вод до річки. Перенесення точки перетину лінії 3 з гідрографом річки з 127 доби (за класичним підходом) на більш ранній термін (107 доба), коли РГВ встановився вище за рівень в річці, узгоджує співвідношення весняного стоку до літнього із даними, представленими на рис. 4.

Натомість, 1982, 1988, 1997 та деякі інші роки відзначались більш тривалим весняним водопіллям та високими літніми паводками, що дає підстави для збільшення на гідрографах частки літнього ґрунтового стоку з приведенням їх у відповідність до результатів, зображених на рис. 4. У 1989, 1998 та 2011 рр. піки зимових паводків на р. Південний Буг були навіть вищими за весняні, проте це істотно не вплинуло на сезонний розподіл підземного стоку (див. рис. 4). За цих обставин особливо важливе порівняння РГВ та рівня води в річці, оскільки надходження ґрунтових вод за умов тривалого водопілля може бути переривчастим і на гідрографі слід виділяти дві або більше (залежить від дощових опадів) «нульових» фаз для припливу ґрунтових вод. В той час, як на заплаві спостерігається підпір РГВ та підтоплення, на більшій частині

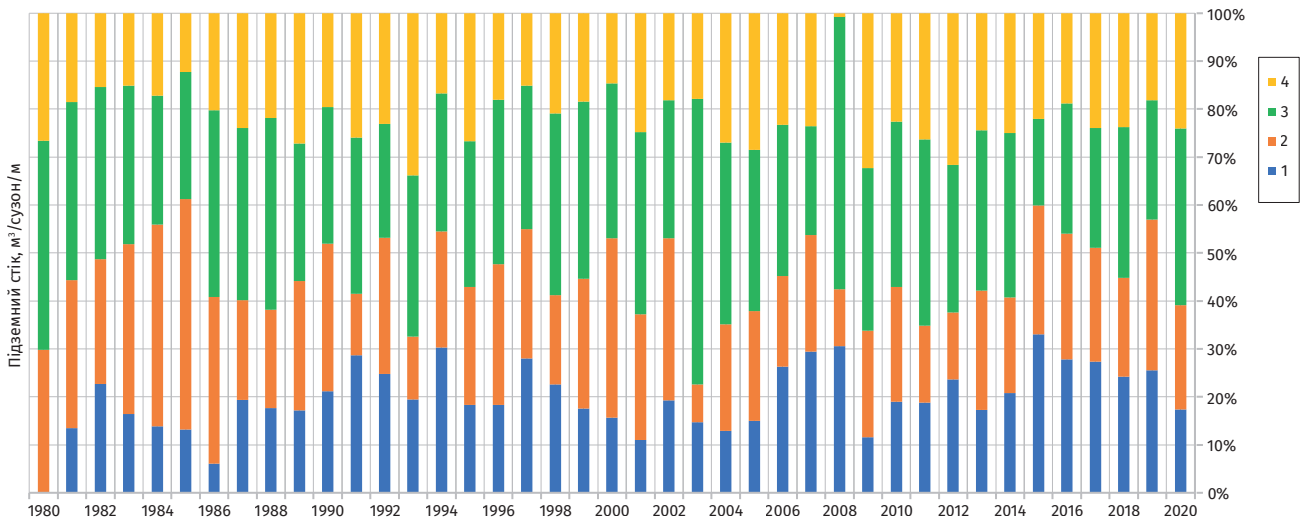


Рис. 4. Сезонний розподіл питомого стоку ґрунтових вод з лівобережної частини водозбору р. Південний Буг (м. Хмільник Вінницької області) за: 1 – зиму; 2 – весну; 3 – літо; 4 – осінь

Fig. 4. Seasonal distribution of specific groundwater runoff from the left-bank part of the Pivdennyi Buh River watershed (Khmilnyk city, Vinnytsia region) for: 1 – the winter period; 2 – spring; 3 – summer; 4 – autumn

водозбору РГВ істотно вищі, ніж у річці внаслідок зростання інфільтраційного живлення талими водами. Тому перетікання ґрунтових вод до напірних через гідравлічні вікна у місцевих водотривах та можливі «аномальні зони посиленої міграції» (Шестоपालов та ін., 2007) може зрости, і висхідне розвантаження напірних вод (глибоке живлення) через русло річки не лише не припинятиметься, а й зростатиме. Подібний сценарій реалізувався на багатьох річках весною 2023 р., коли внаслідок рясних дощів у квітні спостерігались значні за площею підпори РГВ і підтоплення.

Дуже схожим на гідрограф 1980 р. був гідрограф р. Південний Буг за 2006 р. (рис. 5), проте значно більша кількість літніх опадів внесла істотні відмінності в сезонний розподіл обсягів припливу ґрунтових вод до річки.

З графіків на рис. 3, в видно, що під час водопілля зворотне живлення проявляється лише в зоні до 40–45 м від річки. На відстані 68 м відтік приблизно дорівнює припливу, а далі, ближче до вододілу питомі витрати ґрунтових вод добре корелюють із розвитком водопілля на річці та підйомом РГВ на водозборі. Проте при розчленуванні гідрографа бічний стік із

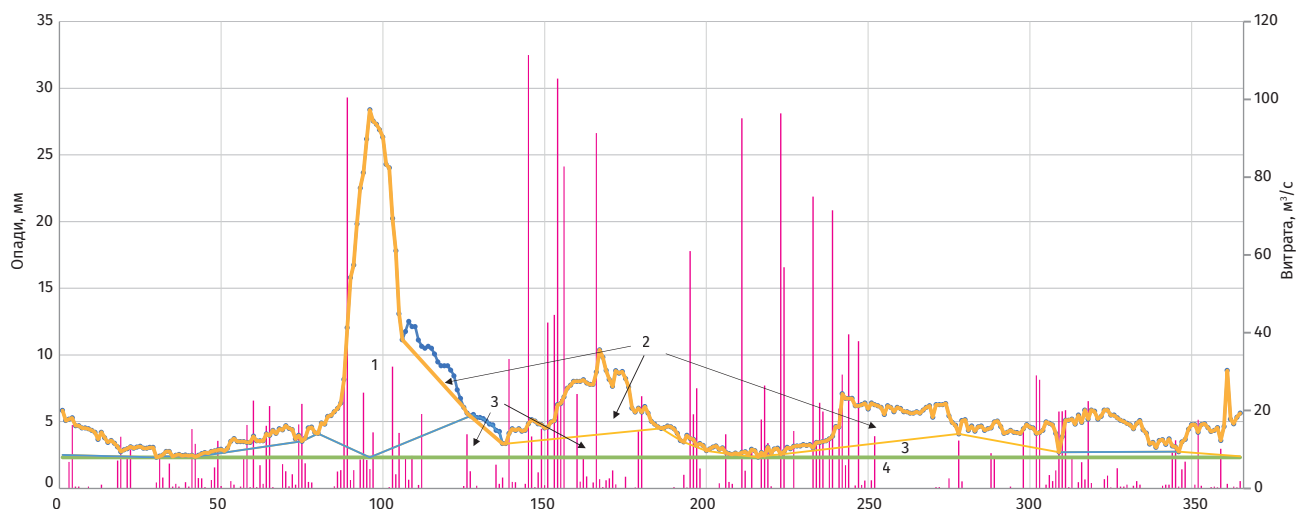


Рис. 5. Гідрограф стоку р. Південний Буг за 2006 р. з виділенням часток: 1 – снігового живлення; 2 – дощового живлення; 3 – неглибокого ґрунтового живлення; 4 – глибокого підземного живлення

Fig. 5. Hydrograph of the Pivdennyi Buh River runoff in 2006 with the allocation of components: 1 – snow recharge; 2 – rainfall recharge; 3 – shallow groundwater recharge; 4 – deep subsurface recharge

значно більшої ніж заплава частини водозбору не враховується лише тому, що на заплаві існує підпір РГВ. Тоді ці витрати повинні перейти на літній період, на який здебільшого припадає найбільша різниця рівнів (на р. Південний Буг, у 136 м від берега влітку $\Delta H_{\text{літні}} = 0,87$ м, за інший час 0,025 м) і максимальні градієнти потоку ґрунтових вод до річки, що узгоджується із гідродинамічними розрахунками (див. рис. 4). Але на гідрографі таке зростання витрат влітку часто не відображають.

Таким чином, головним критерієм виділення фази наростання ґрунтового стоку до річки повинен бути не початок зниження витрат річки (за традиційним підходом до розчленування гідрографа), а початок зниження рівня ґрунтових вод на фоні нижчого рівня води в річці – че-

рез деякий час після проходження піку повені. Для виділення цієї фази на гідрографі необхідно порівнювати графіки РГВ на віддалі близько 15 м від річки з графіками рівнів у річці та витрат річки.

Важливим у процедурі уточнення результатів розчленування гідрографа річки є також порівняння динаміки РГВ та підземного стоку до річки (рис. 6). Встановлення емпіричної залежності стоку від РГВ, значення якого отримуємо в результаті прямих спостережень, дозволяє прогнозувати або відтворювати значення підземного стоку та коригувати напрямок стоку ґрунтових вод на гідрографі. Наприклад, для балансової ділянки в районі м. Хмельник характерна добре виражена пряма залежність шару стоку ґрунтових вод (мм) від РГВ, що є цілком

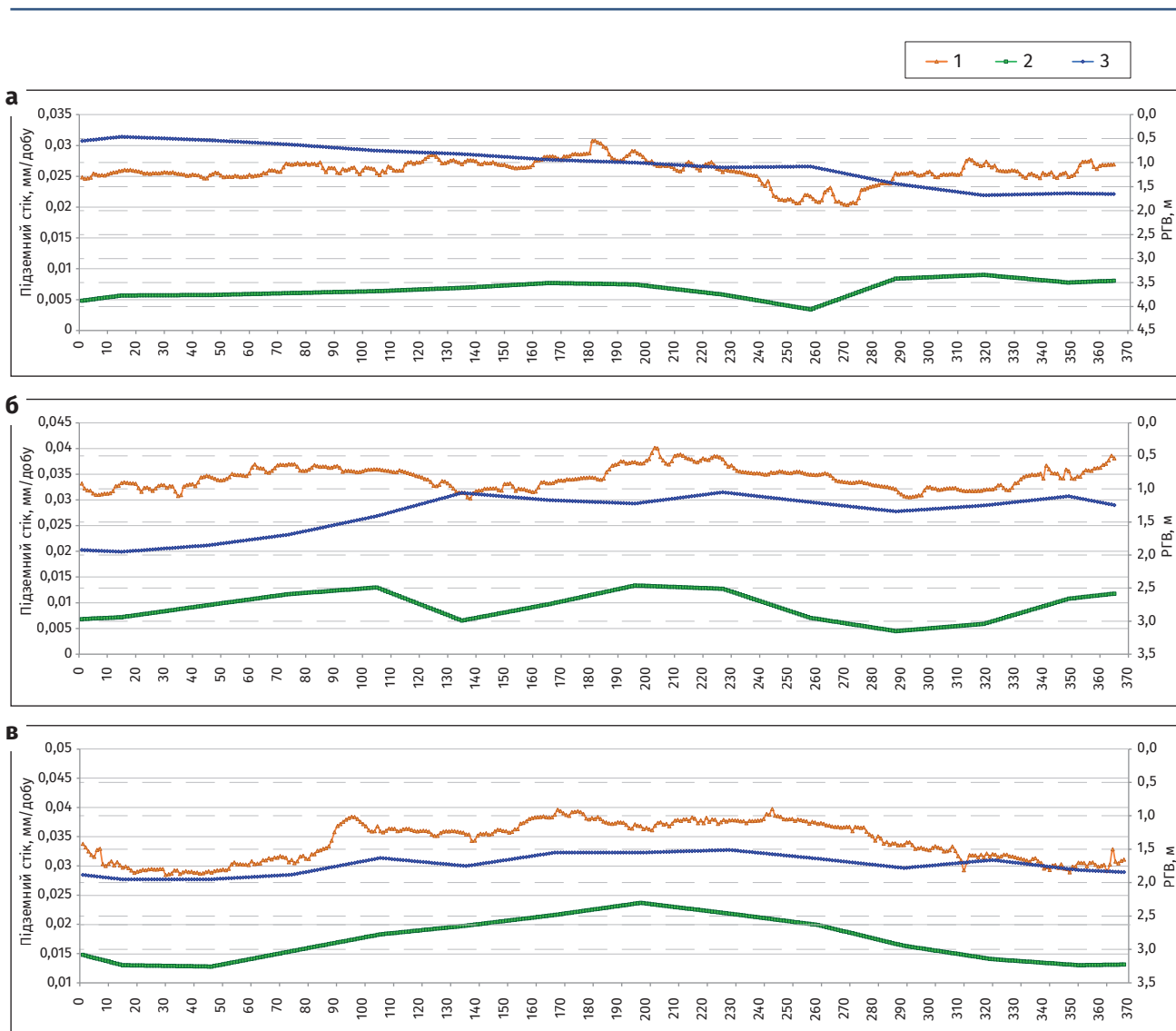


Рис. 6. Щодобові зміни стоку ґрунтових вод до р. Південний Буг (1) та їх рівня від поверхні (2, 3) в створі м. Хмельник на відстані: 1 – 96 м від річки, мм; 2 – 136 м від річки; 3 – 84 м від річки; а – за 1989 р., б – за 1997 р., в – за 2006 р.

Fig. 6. Daily changes in groundwater flow to the Pivdennyi Buh River (1) and its level from the surface (2, 3) in the Khmelnyk city at a distance: 1 – 96 m from the river, mm; 2 – 136 m from the river; 3 – 84 m from the river; а – for 1989, б – for 1997, в – for 2006

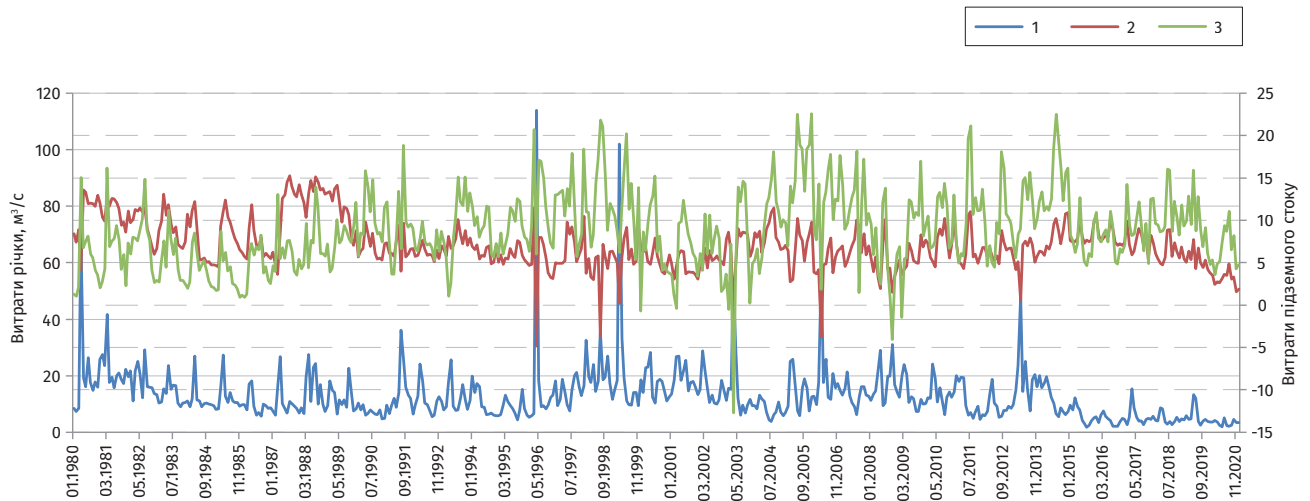


Рис. 7. Порівняння динаміки середньомісячних витрат стоку р. Південний Буг в створі «Лелітка» ($\text{m}^3/\text{с}$) (1) та питомого сумарного місячного стоку ґрунтових вод на заплавної острівній ділянці (2) (42 м від річки) і лівобережній підвищеній ділянці (3) (68 м від річки), $\text{m}^3/\text{місяць}/\text{м}$, за 1980–2020 рр.

Fig. 7. Comparison of the dynamics of the average monthly discharge of the Pivdennyi Buh River in the hydrological gauge “Lelitka” (m^3/s) (1) and the specific total monthly groundwater discharge in the flood plain island area (2) (42 m from the river) and the left-bank area (3) (68 m from the river), $\text{m}^3/\text{month}/\text{m}$, for 1980–2020

логічним, оскільки: за середніх багаторічних значень РГВ близько 3,5 м вплив випаровування незначний і розвантаження ґрунтових вод відбувається головним чином внаслідок бічного відтоку; в рівняннях латеральної фільтрації витрати напряму залежать від висоти напору та градієнта.

Добре збігаються максимуми стоку ґрунтових вод до річки, виділені обома порівнюваними методами. Так, згідно з розчленуванням гідрографа р. Південний Буг за 1980 р., максимуми стоку припадають на 6 і 7 травня, а за гідродинамічними розрахунками – на 6 травня; так само у липні відповідно до гідрографа – на 186 і 187 доби, за розрахунками – на 4 червня, або 186 добу. Також у більшості випадків синхронізуються максимуми витрат річкового стоку із мінімумами витрат потоку ґрунтових вод до річки – насамперед для неглибоких ґрунтових вод поблизу річки (рис. 7).

Враховуючи, що водність кожного конкретного дня, місяця і року визначається умовами формування стоку попереднього дня, місяця і року, а також, в свою чергу, визначає водність наступного дня, місяця або року, при визначенні частки глибокого підземного живлення на гідрографі варто враховувати не лише мінімальну витрату води кожного конкретного року, а і попереднього та за можливості наступного (Лободзінський, Данько, 2023). Для більш точного визначення величини глибокого підземного живлення на конкретний термін запропоновано інтерполювати дані між мінімальними значен-

нями витрат сусідніх років за весь досліджуваний період. Завдяки цій процедурі отримуємо не горизонтальну лінію, а більш опуклу, тобто частка глибокого підземного стоку в даному випадку дещо збільшується.

З досвіду виконаної роботи ми дійшли висновку, що доцільними допоміжними процедурами для підвищення точності методу розчленування гідрографа можуть бути:

- а)** встановлення наявності гідравлічного зв'язку між водоносним горизонтом та річкою шляхом визначення коефіцієнтів кореляції та зіставлення хронологічних графіків змін рівнів та витрат води в річці із рівнями ґрунтових вод на водозборі, визначення глибини залягання водотривкого ложа водоносного горизонту поблизу урізу води в річці;
- б)** порівняння хронологічних графіків (у межах року) змін абсолютних відміток рівнів поверхневих, ґрунтових та напірних міжпластових вод для гідравлічно пов'язаних пунктів спостереження (річкових гідрометричних створів та куців свердловин) – для виділення періодів *однонаправленого водообміну*;
- в)** визначення одного або кількох значень витрат річки, що повністю забезпечуються підземним стоком (для верхньої частини річки без бічних припливів визначається комплексуванням гідрометричного та гідродинамічного методів), припускаючи, що мінімальний річковий стік під час літньої межени повністю забезпечується підземним стоком;

- г) встановлення залежності витрат підземних вод від їх рівня для межених періодів, що дозволяє пропорційно екстраполювати отримані значення витрат на інші періоди з подібними градієнтами потоку (крім періодів, коли рівень ґрунтових та міжпластових вод нижчий за рівень поверхневих вод);
- д) порівняння динаміки атмосферних опадів, особливо у теплий період року, з хронологічним графіком витрат води в річці (гідрографом) – для малих водотоків та водозборів, згідно з О.І. Крестовським (1960), величину підземного стоку можна приймати рівною добовим витратам у замикаючому створі водотоку у весняні та осінні періоди через 2–5 діб після випадіння опадів;
- е) встановлення емпіричної залежності між градієнтом та величиною ґрунтового живлення річки. Виділений на гідрографі підземний стік може мати похибки, пов'язані із неврахуванням градієнта бічного потоку до річки. Емпірична залежність між градієнтом та величиною ґрунтового живлення річки може виявитись більш

репрезентативною, ніж залежність між РГВ та витратами річки. Попередню таку залежність варто відкалібрувати для окремих спряжених створів, що простягаються від вододілу до річки. Підкреслимо також, що результати, отримані кожним із порівнюваних методів, можуть мати розбіжності. Це пояснюється значними відмінностями за масштабами застосування методів та, власне, об'єктами оцінювання. Тобто, приплив ґрунтових вод до річки:

- визначений за допомогою методу розчленування гідрографа, характеризує результуючу гідрологічну ситуацію для всього водозбору, що поставляє поверхневі та підземні води до створу, в якому вимірюються витрати;
- визначений за допомогою гідродинамічного методу, дозволяє виявити закономірності в динаміці стоку ґрунтових вод, що характеризують певний тип режиму (вододільний, на схилах, терасовий, прирічковий тощо) і з певними припущеннями можуть бути поширені на ділянки з аналогічним режимом та гідрогеологічними умовами.

Таблиця. Зіставлення значень складових живлення та загального стоку, отриманих за результатами розчленування гідрографа та з урахуванням гідродинамічних розрахунків

Table. Comparison of the recharge components values and total flow, obtained by the results of hydrograph separation and taking in to account hydrodynamic calculations

Метод	Снігове живлення		Дощове живлення		Ґрунтовий стік		Глибоке підземне живлення	
	1980	2006	1980	2006	1980	2006	1980	2006
Розчленування гідрографа	26,7	27,0	11,9	16,5	31,4	15,6	30,0	40,9
Розчленування гідрографа + чисельний метод	24,8	25,1	11,4	14,3	33,8	20,0	30,0	40,6

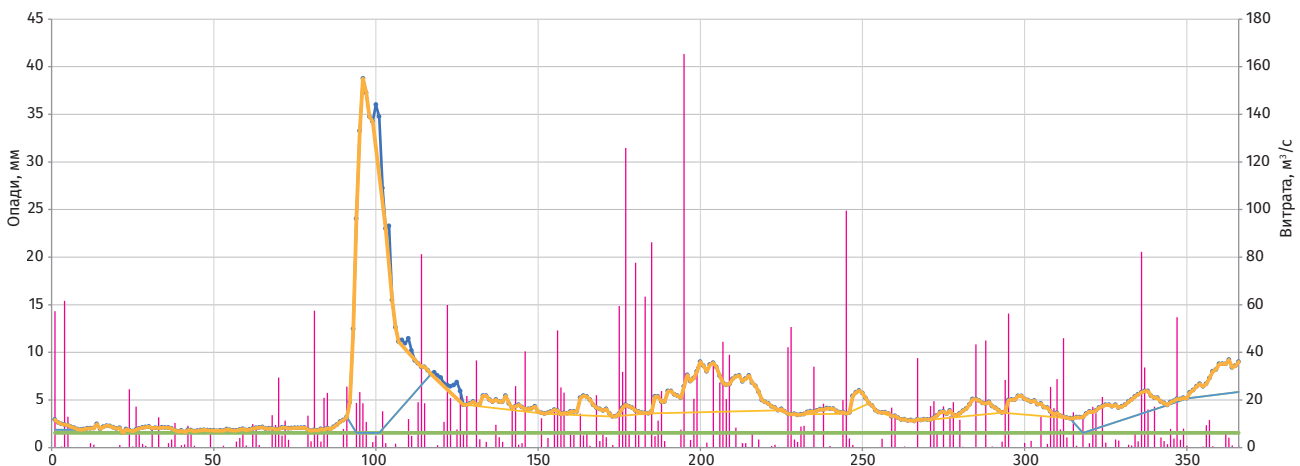


Рис. 8. Гідрограф р. Південний Буг за 1980 р., розчленований з урахуванням результатів розрахунків питомого ґрунтового стоку до річки чисельним методом. Умовні позначення ті ж самі, що на рис. 5

Fig. 8. Hydrograph of the Pivdennyi Buh River for 1980, corrected by calculations of specific runoff to the river using the numerical method. The symbol sare the ameas in Fig. 5

На підставі зіставлення результатів визначення ґрунтового стоку двома методами отримано кориговані варіанти гідрографів р. Південний Буг за 1980 (рис. 8) та інші роки і з дещо більшою часткою ґрунтового стоку (за рахунок фази спаду весняної повені та грудня), ніж за методом розчленування гідрографа (див. таблицю; рис. 3, б).

Дещо несподівано виглядає зникнення ґрунтового стоку до річки восени 1980 р. на 317–320 добу (див. рис. 8), що не кореспондується із хоча й невеликими, проте частими опадами. Таке явище можна пояснити підпором від водосховища, гребля якого розташована на відстані 10,62 км нижче за течією (Shevchenko et al., 2022). Схожі події відбувались в такий самий час і у 2006 та 2008 рр. (див. рис. 4), коли на фоні осіннього підвищення РГВ у свердловині, розташованій ближче до річки (св. 5-3), на гідрографі виділялась фаза дуже низького живлення річки ґрунтовими водами.

Отримані обома методами результати підтверджують встановлені раніше тенденції до істотного зменшення абсолютних значень стоку ґрунтових вод до р. Південний Буг під впливом змін клімату (Шевченко та ін., 2021). З 2011 по 2020 р. ґрунтовий стік до річки зменшився більш ніж на 65 %! Так само істотно скоротився майже на 70 % середній за 2015–2020 рр. глибокий напірний приплив порівняно із періодом 1980–2011 рр. Таких результатів не вдавалось отримати при застосуванні лише гідродинамічного методу. Ці результати добре узгоджуються із розрахунковими даними по інших річках України (Зузук та ін., 2019; Lobodzinskyi, Danko, 2022; Лободзінський, Данько, 2023). Встановлені тенденції свідчать про значне спрацювання запасів ґрунтових вод в умовах їх недостатнього живлення. Негативні наслідки для перших від поверхні водоносних горизонтів мала і бездошова тепла осінь 2023 р., що підтверджується супутниковими даними GRACE-FONASA.

Висновки

Метод розчленування гідрографів в умовах деградації державної гідрогеологічної моніторингової мережі залишається єдиним на території України методом, що дозволяє виокремлювати види поверхневого та підземного живлення річок на рівні великих басейнів.

З виконаного аналізу випливає, що за методом розчленування гідрографів ґрунтове живлення річок здебільшого применшується,

а глибоке підземне живлення або виділяється занадто схематично, або може бути не враховане, або, навпаки, завищене. Найбільше складнощів при реалізації методу розчленування гідрографів річок викликає виділення ґрунтового стоку під час багатоводних періодів. Фазу максимального стоку ґрунтових вод до річки варто коригувати за датами початку зниження РГВ після тимчасового підпору від річки та його закінчення на відстані близько 15 м від річки.

Гідродинамічний чисельний метод, що використовує дані спостережень за РГВ у свердловинах, дозволяє отримати достатньо точні значення обсягів підземного припливу на окремих ділянках, за окремі сезони, що є цінним матеріалом для коригування результатів розчленування гідрографів. Застосування гідродинамічного методу буде найбільш коректним, якщо спостереження проводяться на щонайменше двох (за однорідних геологічних умов та симетричної долини) свердловинах, одна з яких розміщується до 15 м від урізу води на підвищеній частині берега, що не затоплюється, а друга – на відстані 50–60 м від неї в бік вододілу.

Виконані нами коригування дозволили уточнити частку ґрунтового живлення р. Південний Буг у верхній її частині (пост «Лелітка»), а саме його збільшення на 2–5 %, порівняно із результатами розчленування гідрографів (за рахунок зменшення снігового і дощового живлення), за час спаду весняної повені та в грудні.

За результатами розчленування гідрографів р. Південний Буг за період 1980–2020 рр. глибоке підземне живлення перевищувало ґрунтове, відповідно 33,4 проти 25,0 % від загального. При цьому сумарний підземний стік витримувався в середньому на рівні 58 %; мінімальне відносне значення 52,5 % отримано для 2019 р., максимальне 65,1 % – для 2020 р.

Подальший розвиток досліджень за даним напрямком повинен бути спрямований на побудову гідрогеологічних розрізів через усі діючі гідрометричні створи України – для визначення типів взаємодії ґрунтових та поверхневих вод і впровадження відповідних підходів до розчленування гідрографів.

Для оцінки підземної та інших складових живлення річок, за відсутності достовірної інформації про коливання рівнів та фільтраційні параметри водоносних горизонтів на великому водозборі, використовують метод розчленування гідрографа річки. В статті проаналізовано суперечності та недоліки цього методу, який спирається на певні схеми та припущення. Для підвищення його точності ми пропонуємо враховувати результати розрахунків бічного припливу ґрунтових вод до річки, виконані чисельним методом за даними спостережень за рівнем ґрунтових вод на репрезентативних балансових ділянках. Слід також обґрунтувати найбільш поширену для водозбору (або його частини) схему взаємодії поверхневих, ґрунтових і напірних міжпластових вод, яка дає підстави для виділення ґрунтового стоку або нехтування ним на час повені. Найбільш дискусійним залишається питання щодо виділення фази «зворотного живлення» ґрунтових вод під час водопілля. Підйом рівня ґрунтових вод на початку водопілля варто розглядати як функцію інфільтраційного живлення та підпору від річки. Внесок підпору регулюється відстанню від річки до спостережної свердловини. Для підтвердження підпору ґрунтових вод на піку повені слід мати щонайменше дві свердловини, одна з яких розміщується в 3–4 м від урізу води на підвищеній частині берега, що не затоплюється, а друга – на відстані 50–70 м від неї в бік вододілу. На спаді повені, з початком зниження рівня води в річці, насамперед спрацьовується купол підпору ґрунтових вод. Фаза наростаючого припливу ґрунтових вод до річки, яка виділяється на гідрографі на етапі зменшення повеневих витрат, пропонується коригувати за датами початку та закінчення зниження рівня ґрунтових вод. Комплексування методів показало, що застосування лише методу розчленування гідрографа занижує частку живлення річки ґрунтовими водами на 2–5 %. За результатами вибіркового розчленування гідрографів р. Південний Буг за 1980–2020 рр. встановлено загальні тенденції змін ґрунтового та глибокого підземного живлення у верхній частині водозбору річки (до створу м. Хмільник): глибоке підземне живлення переважало над ґрунтовым (33,4 проти 25,0 % від загального). При цьому сумарний підземний стік витримувався в середньому на рівні 58 %.

Список літератури

- Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Методы изучения водообмена: Шестопалов В.М. (отв. ред.). Киев: Наукова думка, 1988. 272 с.
- Геолого-економічна оцінка запасів підземних вод по ділянці Скіфська Немирівського родовища для господарсько-питних та технологічних потреб ТОВ «ЛВН ЛІМІТЕД», ділянка надр, де розташовані свердловини №№ 1/12; 2; 3; 5/2069; 6/2040; 8/2039: Терентієв О.Ю. (відп. вик.). Київ: ВК «Геолог», 2018. Кн. 1. 197 с.
- Гребінь В.В., Василенко Є.В. Методичні аспекти виділення підземної складової у живленні річок. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2010. № 4 (21). С. 8–15.
- Зузук Ф.В., Кутувий С.С., Грицюк Ю.В. Роль різних видів живлення річок Волинської області у формуванні їх водних ресурсів. Луцьк: Східноєвроп. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2019. 109 с.
- Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. Москва: Изд-во МГУ, 1960. 344 с.
- Лободзінський О.В., Данько К.Ю. Визначення та оцінка змін типів живлення річок басейну р. Горинь. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2023. № 2 (68). С. 32–42.
- Лучшева А.А. Практическая гидрология. Ленинград: Гидрометеоздат, 1976. 438 с.
- Огиевський А.В. Гидрология суши (общая и инженерная): учебник. Москва: Гос. изд-во с.-х. лит., 1952. 515 с.
- Отчет о детальной разведке подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Припять Киевской области УССР за 1984–1986 гг. (участки Беневский, Усовский) (с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 01.01.1986 г.). Правобережная геологоразведочная экспедиция. Новиков В.Н., Дробноход В.Б., Кошман В.А. Киев, 1986.
- Панасюк Н.И. Определение коэффициента фильтрации аллювиальных песков в районе промплощадки ЧАЭС. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2014. Вип. 23. С. 124–130.
- Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты. Ленинград: Гидрометеоздат, 1946. 480 с.
- Попов О.В. Подземное питание рек. Ленинград: Гидрометеоздат, 1968. 292 с.
- Рубан С.А., Шинкаревський М.А. Гідрогеологічні оцінки та прогнози режиму підземних вод України. Київ: УкрДГР, 2005. 572 с.
- Ситников А.Б. Вопросы миграции веществ в грунтах. Киев: Ин-т геол. наук НАН Украины, 2010. 605 с.
- Соколовский Д.Л. Речной сток (основы теории и методики расчетов). Ленинград: Гидрометеоздат, 1968. 540 с.
- Стрельцов А.О., Шевченко О.Л. Визначення геофільтраційних параметрів алювіальних піщаних голоценових відкладів методом кущових відкачок в Подільському районі м. Києва. *Ідеї та новації в системі наук про Землю*: 36. матеріалів ІХ Всеукр. молодіж. наук. конф. (Київ, 21–22 черв. 2022 р.). Київ, 2022. С. 56.
- Шевченко О.Л., Чарний Д.В., Осадчий В.І., Ільченко А.О. Стік ґрунтових вод у басейні річки Південний Буг в умовах глобального потепління. *Геол. журн.* 2021. № 3 (376). С. 3–16.
- Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. Москва, 2009. 334 с.
- Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.М. Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. Киев: НИЦ РПИ НАН Украины, 2007. 120 с.
- Bailey R.T., Wible T.C., Arabi M., Records R.M., Ditty J. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrol. Process.* 2016. Vol. 30. P. 4420–4433.
- Bizhanimanzar M., Leconte R., Nuth M. Catchment-Scale Integrated Surface Water-Groundwater Hydrologic Modelling Using Conceptual and Physically Based Models: A Model Comparison Study. *Water*. 2020. Vol. 12 (2). P. 363. <https://doi.org/10.3390/w12020363>
- Chan W.C.H., Thompson J.R., Taylor R.G., Nay A.E., Ayenew T., Macdonald A.M., Todd M.C. Uncertainty assessment in river flow projections for Ethiopia's Upper Awash Basin using multiple GCMs and hydrological models. *Hydrol. Sci. J.* 2020. Vol. 65. P. 1720–1737.
- Dai Z., Amatya D.M., Sun G., Trettin C.C., Li G., Li L. A comparison of MIKE SHE and DRAINMOD for modelling forested wetland hydrology in coastal South Carolina, USA. *17th World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering*. Quebec, Canada, Canadian Society for Bioengineering. 2010. P. 1–11.
- Graph. Plotting of mathematical functions. Main. Online. URL: <https://www.padowan.dk/> (last access: 02.01.2024)
- Lobodzinskiy O., Danko K. Long-Term Dynamics of the Underground Feeding of the Horyn River Basin Rivers. *XVI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, Monitoring 2022: 17 Conference Proceedings. Vol. 2022. November 15–18, 2022. Kyiv, Ukraine, 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580203>
- Palupi R., Ramdhan A.M., Suwarman R. Contribution of groundwater toriverdischarge in the Mampangsub-watershed. *International Journal of Science and Society*. 2023. Vol. 5, iss. 3. P. 102–110. <https://www.researchgate.net/publication/371814902>

- Rahman M.M., Thompson J.R., Flower R.J. An enhanced SWAT wetland module to quantify hydraulic interactions between riparian depressional wetlands, rivers and aquifers. *Environ Model Softw* 84. 2016. P. 263–289.
- Shevchenko O., Skorbutn A., Osadchyi V., Osadcha N., Grebin V., Osypov V. Cyclicities in the regime of groundwater and of meteorological factors in the basin of the Southern Bug River. *Water*. 2022. Vol. 14 (14). P. 22–28/ <https://doi.org/10.3390/w14142228>
- Snyder S.F. A conception of RINOFF – Phenomena. National research Council. *Transaction of the American Geophysical Union*: 20th annual Meeting, 26–29 April 1933. 1939. Part 4. P. 725–738.
- Thompson J.R., Refstrup-Sørensen H., Gavin H., Refsgaard A. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in Southeast England. *J. Hydrology*. 2004. Vol. 293 (1–4). P. 151–179. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.017>
- Thompson J.R., Clilverd H.M., Zheng J., Irvani H., Sayer C.D., Huppell C.M., Axmacher J.C. Revisiting hydroecological impacts of climate change on a restored floodplain wetland via hydrological / hydraulic modelling and the UK Climate Projections 2018 scenarios. *Wetlands*. 2023. Vol. 43, No. 71. P. 1–44. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01708-0>
- ## References
- Bailey R.T., Wible T.C., Arabi M., Records R.M., Ditty J. 2016. Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrol. Process*, 30: 4420–4433.
- Geological and economic assessment of underground water reserves of the site Skifs'ka of the Nemyriv'ske field for the economic, drinking and technological needs of LLC "LVN LIMITED", the subsoil area where wells No. 1/12 are located; 2; 3; 5/2069; 6/2040; 8/2039. Terentiev O.Yu. et al. 2018. Kyiv: VC "Geologist". Book 1. 197 p. (in Ukrainian).
- Bizhanimanzar M., Leconte R., Nuth M. 2020. Catchment-Scale Integrated Surface Water-Groundwater Hydrologic Modelling Using Conceptual and Physically Based Models: A Model Comparison Study. *Water*, 12 (2): 363. <https://doi.org/10.3390/w12020363>
- Chan W.C.H., Thompson J.R., Taylor R.G., Nay A.E., Ayenew T., MacDonald A.M., Todd M.C. 2020. Uncertainty assessment in river flow projections for Ethiopia's Upper Awash Basin using multiple GCMs and hydrological models. *Hydrol Sci. J.*, 65: 1720–1737.
- Dai Z., Amatya D.M., Sun G., Trettin C.C., Li G., Li L. 2010. A comparison of MIKE SHE and DRAINMOD for modeling forested wetland hydrology in coastal South Carolina, USA. *17th World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering*. Quebec, Canada, Canadian Society for Bioengineering.
- Graph. Plotting of mathematical functions. Main. Online. URL: <https://www.padowan.dk/> (last access: 02.01.2024)
- Hrebin V.V., Vasylenko Ye.V. 2010. Methodological aspects of the selection of underground constituent in the nourishment of rivers. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia*, 4 (21): 8–15 (in Ukrainian).
- Kudelyn B.Y. 1960. Principles for regional assessment of natural groundwater resources. Moscow: Publisher house MHU (in Russian).
- Lobodzinskiy O., Danko K. 2022. Long-Term Dynamics of the Underground Feeding of the Horyn River Basin Rivers. *XVI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, Monitoring 2022: 17 Conference Proceedings, 2022, November 15–18, 2022. Kyiv, Ukraine, p. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580203>
- Lobodzinskiy O.V., Danko K.Yu. 2023. Determination and assessment of changes in the types of feeding of the rivers of the Horyn river basin. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia*, 2 (68): 32–42 (in Ukrainian).
- Luchsheva A.A. 1976. Practical hydrology. Leningrad: Hydrometeoizdat (in Russian).
- Ohyevskiy A.V. 1952. Land hydrology (general and engineering): textbook. Moscow: Hosudarstvennoe yzdatelstvo selskokhoziastvennoi lyteratury (in Russian).
- Report on detailed exploration of groundwater for domestic and drinking water supply in the city of Pripyat, Kyiv region of the Ukrainian SSR for 1984–1986. (sections Benevskiy, Usovskiy) (with calculation of operational reserves as of 01.01.1986). Right Bank geological exploration expedition.. Novykov V.N., Drobnokhod V.B., Koshman V.A. Kyiv (in Russian).
- Palupi R., Ramdhan A.M., Suwarman R. 2023. Contribution of groundwater to overdischarge in the Mampangsub-watershed. *International Journal of Science and Society*, 5, 3: 102–110. <https://www.researchgate.net/publication/371814902>
- Panasiuk N.I. 2014. Determination of the filtration coefficient of alluvial sands in the area of the Chernobyl nuclear power plant industrial site. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostansii i Chornobylia*, 23: 124–130 (in Russian).
- Polyakov B.V. 1946. Hydrological analysis and calculations. Leningrad: Gidrometeoizdat (in Russian).
- Popov O.V. 1968. Underground river feeding. Leningrad: Gidrometeoizdat (in Russian).
- Rahman M.M., Thompson J.R., Flower R.J. 2016. An enhanced SWAT wetland module to quantify hydraulic interactions between riparian depressional wetlands, rivers and aquifers. *Environ Model Softw* 84: 263–289.
- Ruban S.A., Shinkarevskiy M.A. 2005. Hydrogeological assessments and forecasts of the groundwater regime of Ukraine. Kyiv: UkrDGRI (in Ukrainian).
- Shestakov V.M. 2009. Hydrogeodynamics. Moscow, p. 120–145 (in Russian).
- Shestopalov V.M., Bohuslavskiy A.S., Bublisy V.M. 2007. Assessment of groundwater protection and vulnerability, taking into account rapid migration zones. Kyiv: NYTs RPY NAN Ukrainy (in Russian).
- Shevchenko O.L., Charny D.V., Osadchyi V.I., Ilchenko A.O. 2021. Groundwater flow in the Pivdennyi Buh River basin in the context of global warming. *Geologichnij zhurnal*, 3 (376): 3–16. doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237361 (in Ukrainian).
- Shevchenko O., Skorbutn A., Osadchyi V., Osadcha N., Grebin V., Osypov V. 2022. Cyclicities in the regime of groundwater and of meteorological factors in the basin of the Southern Bug River. *Water*, 14 (14): 2228. <https://doi.org/10.3390/w14142228>
- Snyder S.F. 1939. A conception of RINOFF – Phenomena. National research Council. *Transactions of the American Geophysical Union*: 20th annual Meeting, 26–29 April 1933. Part 4, p. 725–738.
- Sokolovskiy D.L. 1968. River flow (fundamentals of theory and calculation methods). Leningrad: Gidrometeoizdat (in Russian).
- Streltsov A.O., Shevchenko O.L. 2022. Determination of geofiltration parameters of alluvial sandy Holocene deposits by the method of bush pumping in the Podilskiy district of Kyiv. *Ideii ta novatsii v systemi nauk pro Zemliu*: Zbirnyk materialiv IX Vseukr. Molodizhnoi nauk. konf. (Kyiv, 21–22 June 2022). Kyiv, p. 56 (in Ukrainian).
- Sitnikov A.B. 2010. The issue of migration of substances in soils. Kyiv: Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine (in Russian).
- Thompson J.R., Refstrup-Sørensen H., Gavin H., Refsgaard A. 2004. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in Southeast England. *J. Hydrology*, 293 (1–4): 151–179. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.01.017>
- Thompson J.R., Clilverd H.M., Zheng J., Irvani H., Sayer C.D., Huppell C.M., Axmacher J.C. 2023. Revisiting hydroecological impacts of climate change on a restored floodplain wetland via hydrological hydraulic modelling and the UK Climate Projections 2018 scenarios. *Wetlands*, 43: 71. <https://doi.org/10.1007/s13157-023-01708-0>
- Zuzuk F.V., Kutovyi S.S., Hrytsyuk Y.V. 2019. The role of different types of feeding rivers of the Volyn region in the formation of the ir water resources. Lutsk: Eastern Europe. National Univ. Lesi Ukrainka (in Ukrainian).
- Water exchange in hydrogeological structures of Ukraine. 1988. Methods for studying water exchange. Chief ed. Shestopalov V.M. Kyiv: Naukova Dumka, p. 53–118 (in Russian).