



<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237361>
УДК 556.332.62:556.168

О.Л. ШЕВЧЕНКО^{1*}, Д.В. ЧАРНИЙ², В.І. ОСАДЧИЙ¹, А.О. ІЛЬЧЕНКО¹

¹ Український гідрометеорологічний інститут НАН України та ДСНС України, Київ, Україна
E-mail: shevch62@gmail.com; osad@uhmi.org.ua; nastianastia@i.ua

² ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна
E-mail: dmitriych10@gmail.com

* Автор для кореспонденції

СТІК ГРУНТОВИХ ВОД У БАСЕЙНІ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ

Розглянуто зміни розрахованих значень питомого стоку ґрунтових і напірних вод до річок Південний Буг (м. Хмельник) та Згар (притока Південного Бугу, Вінницька та Хмельницька області) по сезонах і багаторічних етапах, в цілому за 38 років (1980—2017 рр.). Виділено закономірності сезонних змін підземного стоку на ділянках з різним рельєфом та середньобагаторічними рівнями ґрунтових вод у межах 0,5—1,5; 0,8—2,5 та 2,7—4,5 м. Встановлено, що ці зміни тісно пов'язані з аномальними коливаннями температури повітря. Виділено чотири етапи послідовних змін у режимі ґрунтових вод та в обсягах їх стоку до річок: I. 1980—1989 (1990) рр. — традиційно мінімального зимового та осіннього підземного стоку, помірного літнього та переважаючого весняного, домінування стоку з ділянки з високими рівнями ґрунтових вод; II. 1990—1998 рр. — зростання та переважання підземного стоку з ділянки з низькими рівнями ґрунтових вод, зниження до багаторічного мінімуму підземного стоку на ділянці з високими рівнями ґрунтових вод (1—2,5 м); III. З 1999 по 2014 р. — превалюючого зимового стоку над весняним, повільного зростання обсягів підземного стоку на обмеженій ділянці водозбору з рівнями ґрунтових вод 1,0—2,5 м; високоамплітудні коливання стоку та рівнів ґрунтових вод з досягненням багаторічних максимумів на ділянці з рівнями ґрунтових вод 2,5—4,0 м; IV. 2015—2019 рр. — найбільш інтенсивного зниження рівнів ґрунтових вод, а у верхів'ях малих річок — і підземного стоку до річок.

Ключові слова: ґрунтові води; підземний стік у річки; витрати, режим; рівень ґрунтових вод; температура повітря; сезонні зміни; циклічність; ресурси; інфільтраційне живлення.

Вступ

Вплив глобального потепління поширюється не лише на клімат, рослинність та наземну гідросферу. Вже очевидними стали зміни в режимі рівнів ґрунтових та міжпластових вод (Pozzi

et al., 2013; Taylor et al., 2013; Deng et al., 2018; Шевченко та ін., 2019). Тим не менш, як відомо, у змінах водності річок та динаміці рівнів ґрунтових вод (РГВ) простежуються закономірні ритми: багатоводні періоди змінюються маловодними, через певний час перші повер-

Цитування: Шевченко О.Л., Чарний Д.В., Осадчий В.І., Ільченко А.О. Стік ґрунтових вод у басейні річки Південний Буг в умовах глобального потепління. *Геологічний журнал*. 2021. № 3 (376). С. 03—16. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237361>

Citation: Shevchenko, O.L., Charny, D.V., Osadchiy, V.I., Il'chenko, A.O. (2021). Groundwater runoff in the Pivdennyi Buh river basin in conditions of global warming. *Geologičnij žurnal*, 3 (376), 03-16. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237361>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2021. 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, 2021. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

таються і рівні та витрати річок відновлюються. Так само, залежно від циклів сонячної активності (найбільш чіткий з них триває 11 років), змінювались раніше і періоди теплих та відносно холодних років. Наявність зворотності процесів та циклічних коливань дає підстави для оптимістичного погляду на сучасні зміни в довкіллі. Однак останні 40 років ми маємо неухильне зростання температури з середньою інтенсивністю 0,45—0,55 °С/10 років, зокрема у Лісостеповій зоні України. Крім того, незважаючи на тривалі дощі та деяке зниження температури весною 2021 р., помітного відновлення РГВ на значній території України не відбувається. Звідси виникає занепокоєння: чи є зниження РГВ, які ми спостерігаємо останні 6—8 років, зворотними і як це впливає на живлення річок ґрунтовими водами? Очевидно, що вивчення змін режиму, балансу та ресурсів ґрунтових вод в умовах потепління клімату є першочерговим завданням гідрогеології, яке має загальне народногосподарське значення. Надзвичайно важливо з'ясувати та передбачити особливості формування підземних вод під впливом змін клімату для надання зацікавленим водокористувачам сценаріїв очікуваних кількісних змін водних ресурсів.

Попередні результати (Шевченко та ін., 2019; Шевченко и др., 2019), отримані нами з аналізу даних державного гідрогеологічного моніторингу, дають підстави для висновків про приховані зміни водообміну в системі «підземні — поверхневі води» та загрозливі тенденції у змінах ресурсів ґрунтових, а подекуди (Хмельницька, Миколаївська, Одеська та інші області) й напірних вод. Для з'ясування причин та глибини порушень режиму ґрунтових вод варто провести додаткові дослідження.

Отже, в даній роботі ми поставили за мету дослідити зміни стоку ґрунтових вод до річок за 38 років (з 1980 р.) — багаторічний період достеменних проявів глобального потепління, а також з'ясувати обумовленість цих змін режимоформуючими чинниками. Оскільки ступінь впливу змін температури і кількості опадів на величину підземного стоку для ділянок з різними гідрогеологічними умовами може бути різним або не проявляться зовсім, вирішено для більшої коректності та обґрунтованості висновків порівняти ступінь залежності стоку від температури та інших чинників на ділян-

ках з різними середньобогаторічними рівнями (0,9; 1,76 і 3,65 м від поверхні). При цьому зміни температури, кількості опадів та річкового стоку для цих ділянок були практично однакові.

Передбачається, що, порівнюючи динаміку підземного стоку за великий проміжок часу з ділянок водозбору з різними РГВ та градієнтами потоку, ми зможемо з'ясувати, за яких умов підвищення температури повітря впливає на підземний стік найбільше та які ділянки є більш-менш захищеними від впливу посухи.

Об'єкти досліджень

В якості об'єктів досліджень обрано ділянки дренавання ґрунтових вод річкою Південний Буг у м. Хмельник, де моніторингові спостереження за РГВ проводяться з 1950 р., а поблизу, вище за течією річки в с. Лелітка розташований гідрометричний створ. На першій з ділянок (св. 5-3), розташованій у західній частині острова, РГВ за багаторіччя коливались у межах 0,8—2,5 м, на другій ділянці, приуроченій до лівобережної першої надзаплавної тераси річки (св. 5-5), РГВ коливаються в межах глибин 2,7—4,5 м від поверхні.

Гідрогеологічні особливості ділянок досліджень обумовлені приналежністю їх до Українського масиву тріщинних вод, зокрема області дренавання четвертинних алювіальних відкладів перших надзаплавних терас та вод кори вивітрювання кристалічних порід у межах неглибокого ерозійного врізу долини у верхній частині течії р. Південний Буг (рис. 1). Алювіальні відклади складені пухкими піщанистими та глинистими осадами.

Варто зазначити, що хоча режим ґрунтових вод, за визначенням служби державного моніторингу, вважається непорушеним, на коливання РГВ на ділянці 1 (св. 5-3), напевно, впливає берегоукріплююча захисна дамба, що стримує поверхневий площинний стік з водозбору, сприяючи інфільтраційному живленню ґрунтових вод у її верхньому б'єфі.

Також під час аналізу враховано результати розрахунків стоку ґрунтових вод на ділянці 3 з РГВ 0,5—1,5 м у верхів'ях р. Згар — притоки р. Південний Буг та стоку напірних вод (напір 2,8 м над покрівлею) з другого від поверхні водоносного горизонту потужністю близько 3 м у корі вивітрювання кристалічних порід (жор-

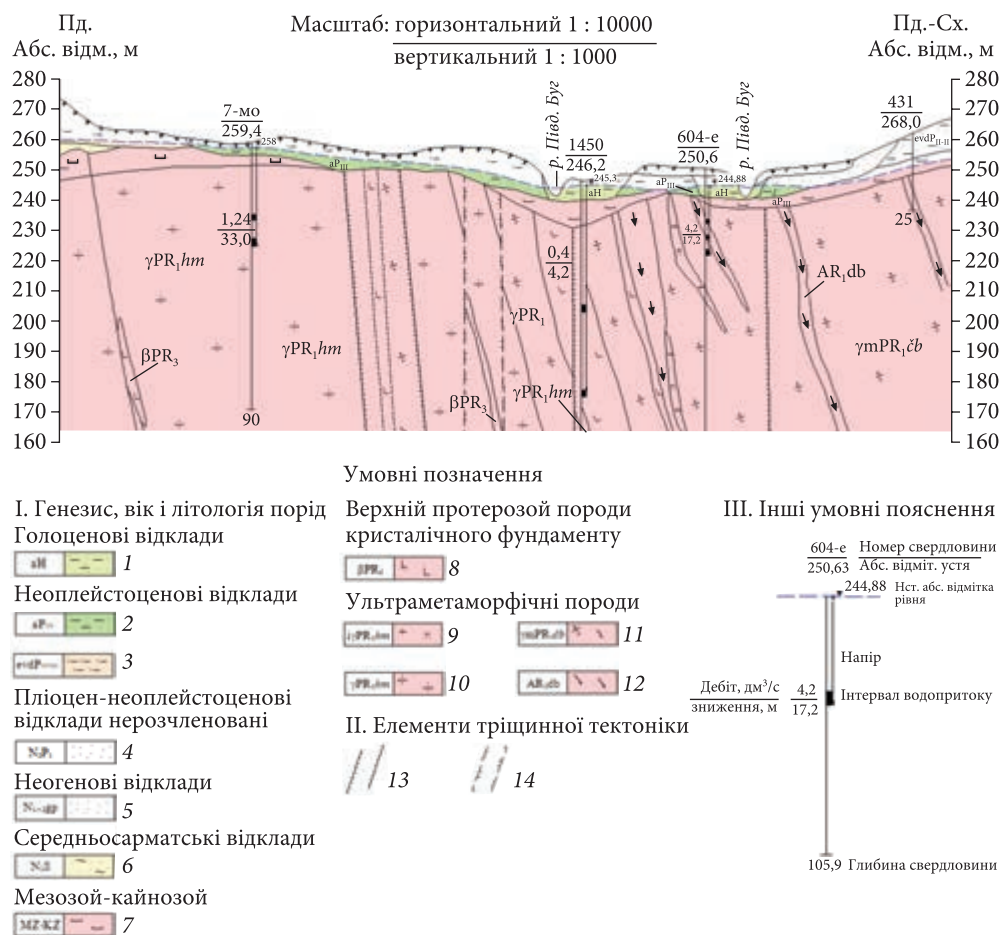


Рис. 1. Геолого-гідрогеологічний розріз з правого (ліворуч) на лівий берег р. Південний Буг через островну ділянку в м. Хмільник Вінницької області: 1 — алювіальні відклади заплавлі річок і дніщ балок: піски різнозернисті, суглинки, супіски; 2 — алювіальні відклади першої надзаплавної тераси: піски, лесовидні суглинки, супіски; 3 — відклади вододілів і їх схилів: елювіально-еолово-делювіальні суглинки лесовидні жовті карбонатні з прошарками супісків; 4 — піски дрібнозернисті; 5 — товща глин сарматського ярусу; 6 — сарматські глини алевритисті, мергелясті, в низах піски різнозернисті, вапняки і піски ракушнякові; 7 — кора вивітрювання кристалічних порід; 8 — діабазы, габро-діабазы; 9 — граніти апліто-пегматоїдні; 10 — граніти силіманіт-гранат-біотитові метасоматично змінені; 11 — граніти і мігматити гранат-біотитові; 12 — гнейси гранат-біотитові; 13 — зони розсуву (зсуви, розриви) з інтенсивною відкритою тріщинуватістю, обводнені; 14 — зони стиснення із закритими тріщинами

Fig. 1. Geological and hydrogeological section from the right (left) to the left bank of the Pivdennyi Buh River through the island area in Khmilnyk town Khmilnyk, Vinnytsia region: 1 — alluvial deposits of floodplains of rivers and bottoms of beams: sands of various grains, loams, sandy loams; 2 — alluvial deposits of the first floodplain terrace: sands, loess, sandy loams; 3 — sediments of watersheds and their slopes: eluvial-aeolian-deluvial loams loessial, yellow, carbonate with layers of sandy loams; 4 — fine-grained sands; 5 — clays of the Sarmatian tier; 6 — Sarmatian clays are silty, marly, in the bottoms sands of various grains, limestones and shell sand; 7 — weathering crust of crystalline rocks; 8 — diabases, gabbro-diabases; 9 — aplite-pegmatoid granites; 10 — sillimanite-garnet-biotite granites are metasomatically altered; 11 — granites and migmatites garnet-biotite; 12 — pomegranate-biotite gneisses; 13 — sliding zones (shifts, ruptures) with intense open jointing, water-flooded; 14 — compression zones with closed cracks

ства, уламки) палеозой-мезозойського віку. В останньому випадку розрахунки стоку виконано за даними спостережень по св. 5-2 (глибина 19 м), що знаходиться на лівому березі р. Південний Буг в м. Хмільник, у 730 м від річки та у 900 м від вододілу. Оскільки дана свердловина розташована на значній віддалі від сверд-

ловин на ґрунтові води (св. 5-3 і 5-5), коректно розрахувати перетікання, тобто виділити напірне живлення/розвантаження ґрунтових вод не вдається. Тому в отриманих значеннях інфільтраційного живлення ґрунтових вод присутня певна частка напірного живлення, насамперед для ділянки 1.

Методи досліджень

Розрахунок одиничних витрат стоку ґрунтових вод на 1 м довжини берега річки виконано за чисельним рівнянням (Вольфцун, 1972), яке у спрощеному вигляді можна представити так:

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

де q_t — витрати ґрунтового потоку на момент часу t в перерізі врізу річки, м²/добу; k_{cep} — середній коефіцієнт фільтрації ґрунтів, м/добу; h_t — середньоарифметичне від висоти рівня води в річці та у розрахунковій свердловині над водотривом водоносного пласта на початковий момент вимірювань, м; I_t — гідравлічний ухил (градієнт потоку); l_t — відстань від врізу 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. Другий член правої частини рівняння береться із знаком плюс у випадку зниження рівня води в річці (тобто відбувається надходження додаткової вологи з об'єму породи в інтервалі зниженого РГВ Δh_t) та із знаком мінус — при підйомі рівня вище РГВ, що створює підпір потоку ґрунтових вод. Отже, якщо другий член рівняння має позитивний знак, то результуюча величина витрат характеризує питомі бокові витрати ґрунтових вод при осушенні горизонту.

Перша складова у правій частині рівняння визначає умовно рівномірний стік у зоні постійного насичення, тобто відповідає за середньобагаторічне значення підземного стоку на ділянці; друга визначає стік (або приплив) із або до зони коливань РГВ. Саме від точності визначення другої складової залежить правильність розв'язання всієї задачі щодо інтерпретації добових, місячних, річних та багаторічних коливань підземного стоку.

Слід враховувати, що за невірного підбору параметрів можна отримати завищені (або занижені) значення підземного стоку, тому необхідна верифікація та перевірка результатів іншими методами та/або балансними розрахунками. Якщо значення параметрів, в тому числі перепадів рівня, завищені, то це відобразиться на непропорційно великому по відношенню до фактичних атмосферних опадів інфільтраційному живленні, що власне і відбулось в першій

ітерації (рис. 2). Відкориговані за балансом та характерними для даної території коефіцієнтами інфільтраційного живлення результати змінюються з меншою амплітудою і не мають від'ємних значень.

Для калібрування розрахункової моделі та остаточної оптимізації фільтраційних параметрів у кожному випадку виконано балансів розрахунки, для яких також обчислювався підземний стік, але вже як бічний відплив/приплив з балансової ділянки (в мм шару стоку) (McDonald, Harbaugh, 1988; Шевченко, Наседкін, 2001):

$$\Delta Q = 2k_\phi \frac{h \cdot \Delta t (H_1 - H_2)}{l^2 + 2lL} \cdot 10^3, \quad (2)$$

де ΔQ — різниця між бічним припливом ($Q_{пр}$) і від ($Q_{в}$) на верхній і нижній за потоком границях балансового майданчика за час Δt для двох пунктів спостережень; k_ϕ — коефіцієнт фільтрації безнапірного водоносного горизонту, м/добу; h — середня для балансового майданчика потужність водоносного горизонту, м; H_1, H_2 — середні за Δt РГВ у пунктах спостережень, м; l — відстань між пунктами спостережень (свердловиною та врізом річки), м; L — відстань від свердловини до лінії підземного вододілу, м; 10^3 — коефіцієнт переходу (в мм шару води).

У такий спосіб розрахункові параметри, як і сама математична модель, були оптимізовані за подвійною процедурою (Karahan, Ayvaz, 2005).

Для дослідження ступеня залежності підземного стоку від режимоформуючих чинників, у тому числі температури повітря та опадів, використано множинний кореляційний аналіз (STATISTICA, 2018) та вейвлет-аналіз (Grossmann, Morlet, 1984).

Результати та їх обговорення

На основі аналізу особливостей підземного стоку до р. Південний Буг на ділянці з плоским рельєфом (ділянка 1) та з лівобережної частини водозбору з нахилом у бік річки (ділянка 2) виділено два великих етапи: 1980—1998 — зменшення стоку на ділянці 1 та його переважачого зростання на ділянці 2 (див. рис. 2); 1999—2017 — стабілізації і незначного зростання стоку на ділянці 1 і високоамплітудних коливань стоку з екстремальними максима-

Рис. 2. Багаторічні зміни питомого (на 1 м довжини річки) підземного стоку до р. Південний Буг у м. Хмельник: 1 — на острівній ділянці (відстань до вододілу становить 270 м); 2 — з лівобережної частини водозбору (до вододілу близько 1500 м) з коригуванням параметрів для значень інфільтраційного живлення та коефіцієнтів інфільтраційного живлення; 3 — те ж саме без коригування параметрів по балансу та коефіцієнта інфільтраційного живлення

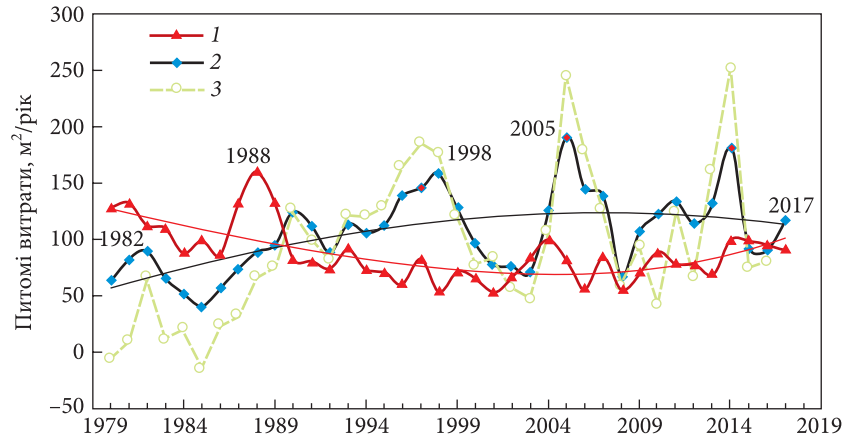


Fig. 2. Perennial changes in specific (per 1 m of river length) underground runoff to the Pivdennyi Buh in Khmilnyk: 1 — on the island site (distance to the watershed 270 m); 2 — from the left-bank part of the catchment (to the watershed about 1500 m) with adjustment of parameters for values of infiltration supply and infiltration supply coefficients; 3 — the same without adjusting the parameters by the balance and the infiltration recharge coefficients

ми на ділянці 2. Для обох етапів виконано множинний кореляційний аналіз з метою пошуку домінуючих чинників впливу на режим ґрунтових вод.

Найбільш вдалим для описання залежності питомих витрат ґрунтових вод на період 1999—2020 рр. для ділянки 1 ($Q_{св. 5-3}$) є ступеневе регресійне рівняння:

$$(Q_{св. 5-3}) = 35,8121656 - 0,0287561641 \cdot P + 0,000309813561 \cdot P^2 + 0,0710601364 \cdot t + 0,00269839712 \cdot t^2 - 0,907195083 \cdot Q_s + 0,00704406658 \cdot Q_s^2, \quad (3)$$

де P — місячна сума опадів; t — середньомісячна температура повітря; Q_s — середньомісячна витрата річкового стоку. Коефіцієнт множинної кореляції достатньо високий $R = 0,735$; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,539$; $p = 0,00001$. Значення t -критерію Стьюдента (рис. 3, праворуч від горизонтальної колонки) визначаються як відношення взятого по модулю коефіцієнта регресії до його стандартної похибки. На діаграмі Парето (див. рис. 3) відображено значення критерію, відсортовані за їхньою абсолютною величиною. Ця діаграма демонструє пріоритетну та практично монозалежність витрат ґрунтових вод на прирічковій ділянці (відстань св. 5-3 до річки сягає 86 м) від величини річкового стоку, що може свідчити і про значну зворотну залежність.

Тісного достовірного зв'язку температури з підземним стоком на даному етапі не просте-

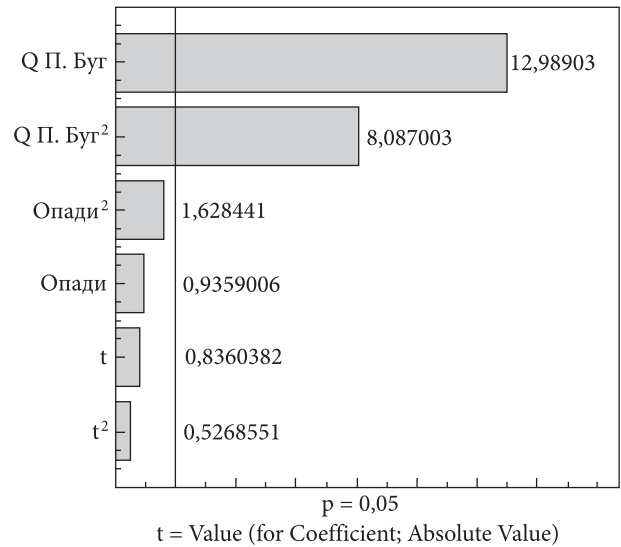


Рис. 3. Діаграма Парето значущості отриманих коефіцієнтів регресійного рівняння (3) за t -критерієм Стьюдента, що демонструє зв'язок між сумарними місячними витратами стоку ґрунтових вод до річки на острівній ділянці (св. 5-3), опадами, температурою (t) і середньомісячними витратами р. Південний Буг (Q П. Буг) за період 1999—2017 рр. Вертикальна лінія вказує на мінімальну величину статистично значущих оцінок параметрів, враховуючи поточний критерій статистичної значущості

Fig. 3. Pareto diagram of the significance of the obtained coefficients of the regression equation (3) by Student's t -test, which shows the relationship between the total monthly flow of groundwater to the river on the island (well No. 5-3), precipitation, temperature (t) and average monthly costs of the Pivdennyi Buh (Q П. Буг) for the period 1999—2017. The vertical line indicates the minimum value of statistically significant estimates of parameters, taking into account the current criterion of statistical significance

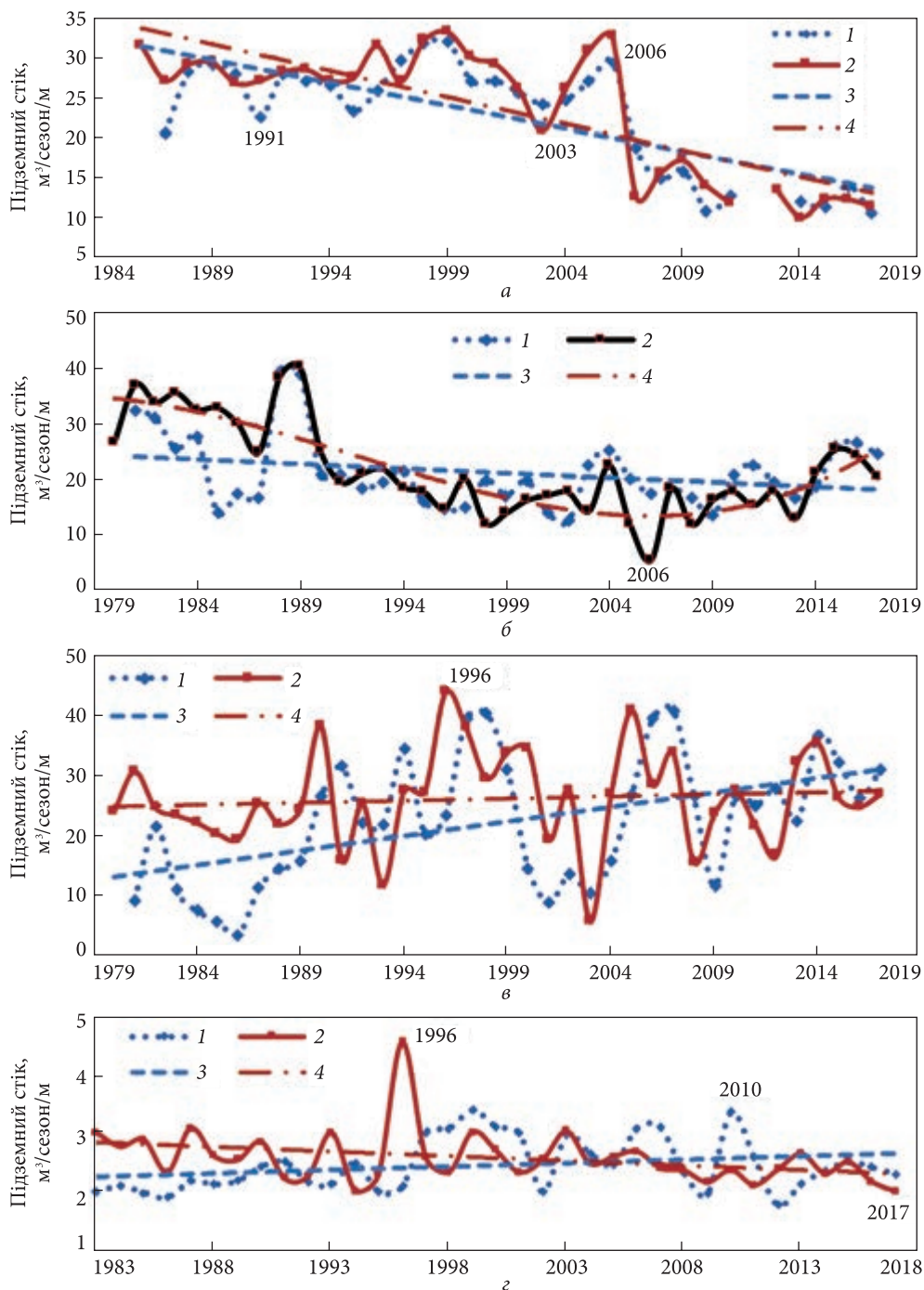


Рис. 4. Зіставлення зимового (1) та весняного (2) стоків ґрунтових вод до річок та їх відповідних трендів (3, 4) на ділянках з різними РГВ: а — 0,5–1,5 м (верхів'я р. Згар), б — 0,8–2,5 м (верхів'я р. Південний Буг, м. Хмільник), в — 2,7–4,0 м (м. Хмільник), г — для напірних вод з рівнем 13,5–14,5 м (св. 5-2, м. Хмільник)
Fig. 4. Comparison of winter (1) and spring (2) groundwater runoff to rivers and their respective trends (3, 4) in areas with different levels (GWT): а — 0.5-1.5 m (upper reaches of the Zgar River), б — 0.8-2.5 m (upper reaches of the Pivdennyi Buh, Khmilnyk town), в — 2.7-4.0 m (Khmilnyk town), г — for pressure waters with a level of 13.5-14.5 m (well No. 5-2, Khmilnyk town)

жується. Більш вагомий зв'язок спостерігається із опадами, проте і він не значущий.

За характером циклічності підземного стоку найбільш тісний зв'язок із температурою

простежується на ділянці 1 в період з 1975 (на цей рік припадає одне з найбільших додатних відхилень середнього максимуму температури січня) по 1989 р. — рік початку найбільш зна-

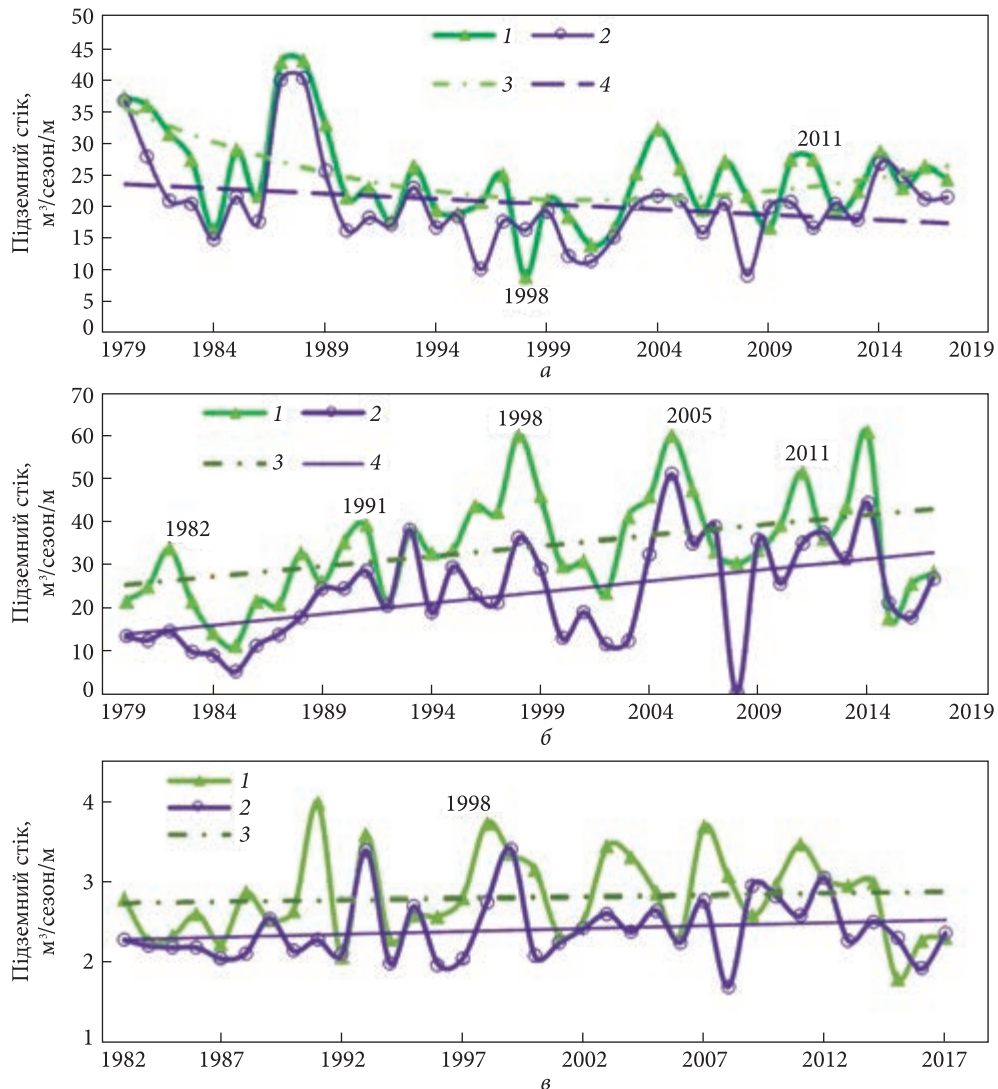


Рис. 5. Динаміка питомих витрат літнього (1) та осіннього (2) стоку з відповідними трендами (3, 4): а — ґрунтових вод з РГВ 0,8—2,5 м (ділянка 1); б — ґрунтових вод з РГВ 2,7—4,5 м (ділянка 2); в — напірних підземних вод другого від поверхні водонесного горизонту (у відкладах кори вивітрювання, св. 5-2) до р. Південний Буг у районі м. Хмільник

Fig. 5. Dynamics of specific costs of summer (1) and autumn (2) runoff with corresponding trends (3, 4): а — unconfined groundwater with GWT 0.8-2.5 m (site 1); б — unconfined groundwater with GWT 2.7-4.5 m (site 2); в — confined groundwater of the second aquifer from the surface (in the sediments of the weathering crust, well No. 5-2) to the Pivdennyi Buh near Khmilnyk town

чущих кліматичних змін в Україні (Степаненко та ін., 2015), коли їх 7—8-річна циклічність збігається (визначено за результатами вейвлет-аналізу (Shevchenko et al., 2020)), а РГВ були найвищими за весь термін спостережень (1951—2020 рр.). З 1990 р. починається тривалий (до нашого часу) період понижених, проте відносно сталих РГВ (близько 50 % забезпеченості) з невисокою амплітудою їх коливань, що більше нагадує режим напірних вод. З 1998 р. зимовий стік здебільшого переважає над весняним, що

відобразилось і на взаємному розміщенні загальних трендів (рис. 4, б). Літній стік зростає з 1999 р. (рис. 5, а). Зростання весняного стоку ґрунтових вод до річки відбулось з 2007 року (рис. 4, б), а загального річного — з 2009 (див. рис. 2).

Зближення весняного та зимового підземного стоку відбувалося не стільки внаслідок збільшення зимового, як за рахунок зменшення весняного стоку, що, крім перерозподілу значної частини талого стоку на зимовий се-

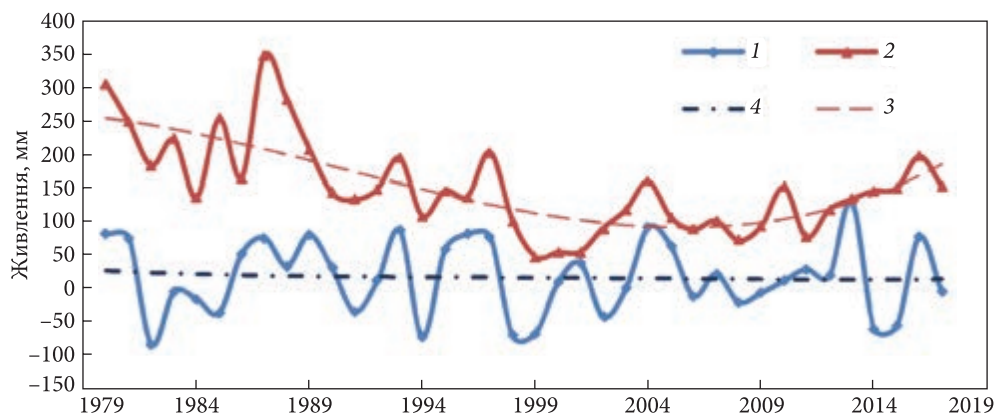


Рис. 6. Динаміка загального живлення (переважно інфільтраційного, частково напірного) ґрунтових вод з РГВ 2,7—4,5 м (1) та 0,8—2,5 м (2) за період достеменно встановлених кліматичних змін. Від’ємні значення означають переважання випаровування та перетікання до нижчого напірного водоносного горизонту

Fig. 6. Dynamics of total supply (mainly infiltration, partially pressure) of unconfined groundwater with GWT 2.7-4.5 m (1) and 0.8-2.5 m (2) during the period of well-established climate change. Negative values indicate the predominance of evaporation and leakage to the lower confined aquifer

зон, є також реакцією на зростання середньосезонної температури з 7,6 до 7,84 у 1990—1998 рр., до 8,8 °С на період 1999—2014 рр. і до середніх 9,7 °С у 2015—2017 рр. Навіть деяке зростання весняного підземного стоку з 2003 р., а на окремих ділянках після 2006 р. залишає його тренд на нижчій позиції. Підземний стік осінньої пори практично завжди менший, ніж такий влітку (див. рис. 5).

Отже, на ділянці з багаторічним коливанням РГВ у межах 0,8—2,5 м істотний безпосередній зв’язок значень підземного стоку з температурою повітря не простежується. Оскільки ця ділянка лежить в межах впливу річки, а також на ній присутнє напірне живлення ґрунтових вод (згідно із співвідношенням напорів у св. 5-2 і 5-3), то і режим ґрунтових вод на ній визначається відповідними режимоформуючими чинниками; температура та опади мають другорядне значення. Проте вплив температури все ж таки добре проявляється в ході коливань величин підземного стоку. Так, метеорологічні зміни 1989 р., а саме перший за весь час спостережень перехід середньомісячних температур лютого до позитивних значень та абсолютний багаторічний максимум температури повітря в грудні місяці (Осадчий та ін., 2013), позначились на стрімкому зростанні ролі зимового стоку, а з 1999 р. — його постійному домінуванні (за трендом) над весняним. При цьому, згідно з розподілом вологи по складових балансу «опади зимового сезону — стік

ґрунтових вод — стік поверхневих вод», значна частина вологи в холодний період року через відсутність промерзання ґрунту витрачається на перетікання у водоносний горизонт напірних вод, що лежить нижче.

Найвищі показники живлення напірного горизонту (від 7,3 до 14,1 мм, за середніх протягом 35 років значень у 8,0 мм, за розрахунками) внаслідок перетікання згори в області, де РГВ знаходяться вище рівнів напірних вод, тобто на площі живлення напірних вод ґрунтовими (відстань до спостережної свердловини від річки становить близько 730 м, до підземного вододілу — 907 м), припадають на період з 1995 по 2006 р. У той же час після 1997 р. почалось зниження рівня напірного водоносного горизонту, яке супроводжувалось зростанням зимового підземного стоку до річки (в усякому разі до 2010 р.) (див. рис. 4, з). Все це свідчить про зростання витрат напірного горизонту як на перетікання вгору у прирічковій зоні, де вертикальні градієнти найбільші, так і на розвантаження в річку. Збільшення перетікання вгору підтверджується стабілізацією РГВ (як вже згадувалось вище) та динамікою змін живлення першого від поверхні водоносного горизонту: якщо до 1999 р. тренд живлення був спадаючим (рис. 6), то надалі він переважно зростає. Посилення живлення напірного горизонту за час відлиг зимового сезону сприятливо відобразалося й на збільшенні його ресурсів до 2010 р.

Виходячи із закономірностей сезонного розподілу підземного стоку, доцільно розділити перший етап на два та виділити сучасний етап у динаміці підземного стоку до річки: I. 1980—1989 рр. — традиційно мінімального зимового (див. рис. 4) та осіннього стоків, помірних літнього та переважаючого весняного стоків для обох ділянок з різним РГВ; домінування обсягів питомого стоку з ділянки з високими РГВ (див. рис. 2); середньосезонна зимова температура за 1980—1989 рр. була найнижчою за весь період розрахунків і становила $-3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (найвища $-0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ була в останньому році етапу). II. 1990—1998 рр. — продовження зростання та перехід на домінуючі позиції підземного стоку з площ з низькими РГВ, зниження до багаторічного мінімуму підземного стоку на площі з високими РГВ (0,8—2,5 м) у зв'язку з найвищими рівнями та підпорами від річки; III. 1999—2014 рр. — повільного зростання (переважно за рахунок зимового та з 2007 р. весняного стоків) з низькоамплітудними коливаннями обсягів підземного стоку на ділянці з РГВ 0,8—2,5 м; високоамплітудних коливань стоку та РГВ з досягненням багаторічних максимумів на ділянці з РГВ 2,7—4,0 м; на ділянці з РГВ 0,8—2,5 м тренд зимового стоку став вищим за весняний з 2001 р., а на ділянці з РГВ 2,7—4,0 м — з 2010 р.; у верхів'ях річок на ділянках з РГВ 0,5—1,5 м стік ґрунтових вод до річки стрімко зменшується як по сезонах (див. рис. 4, а), так і загальний; IV. 2015—2019 рр. — особливо значного потепління взимку; зниження РГВ і витрат підземного стоку до річок за відсутності напірного живлення та його незначне зростання (переважно лише за рахунок зимового та осіннього стоків) у ландшафтах з напірним живленням.

Відповідно до виділених етапів розподіл підземного стоку на ділянці 1 по сезонах наведено на рис. 7.

Після 1989 р. підземний стік до річки з прилеглої до неї ділянки 1 помітно зменшується. Коливання значень підземного стоку на цій ділянці стають низькоамплітудними порівняно зі стоком з лівобережного водозбору (див. рис. 2). Мінімальне значення стоку у 2001 р. сягає $53,4\text{ м}^3/\text{рік}$, максимальне у 2004 р. — $99,84\text{ м}^3/\text{рік}$ (різниця $46,5\text{ м}^3/\text{рік}$), коли рівень та витрати води в річці були мінімальними за 10-річчя. У той же час різниця між багаторіч-

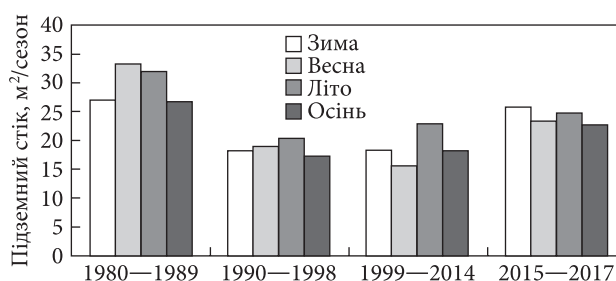


Рис. 7. Сезонний розподіл питомого стоку ґрунтових вод по етапах на острівній ділянці (м. Хмельник) з багаторічними коливаннями РГВ 0,8—2,5 м

Fig. 7. Seasonal distribution of specific groundwater runoff in stages on the island area (Khmilnyk town) with long-term fluctuations of GWT 0.8-2.5 m

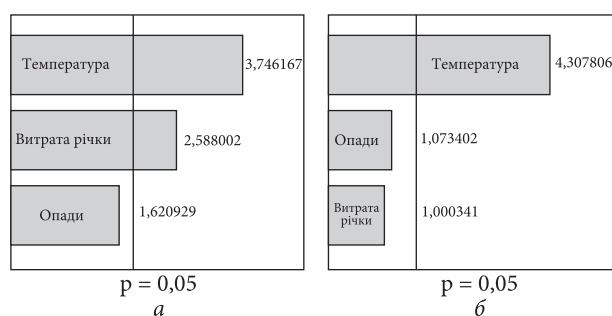


Рис. 8. Діаграма Парето значень стандартизованих коефіцієнтів змінних. Зв'язок між підземним стоком, опадами, температурою і витратами р. Південний Буг: а — за 1980—1998 рр.; б — за 1999—2016 рр.

Fig. 8. Pareto diagram of values of standardized coefficients of variables. The relationship between groundwater runoff, precipitation, temperature and flow of the Pivdennyi Buh River: a — for 1980-1998; b — for 1999-2016

ними мінімумами та максимумами на лівобережній частині водозбору (за рівнів понад 3,0 м) помітно зростає (див. рис. 2). На цій, більш представницькій за гідрогеологічними умовами ділянці 2, віддаленій від річки на 136 м, серед проаналізованих чинників (опадів, витрати річки, температура) найбільший вплив на величину підземного стоку мала температура повітря (хоча показники лінійних рівнянь не надто високі, зокрема R по виділених етапах становив відповідно 0,37 і 0,35). Її вплив на сучасному етапі (рис. 8) ще більше зростає, а ваговий коефіцієнт впливу опадів на стік ґрунтових вод зменшується. Після закінчення прояву підпорів від річки (близько 2003 р.) зв'язок з витратами річки впав за значущі межі.

Найвищий серед інших чинників рейтинг температури за впливом на підземний стік з ділянки 2 підкріплюється найтіснішим зв'язком

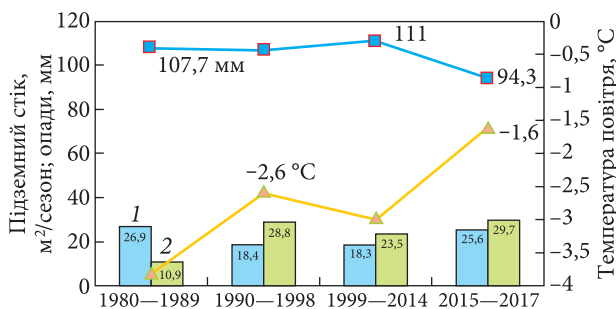


Рис. 9. Порівняння по етапах динаміки середніх за зимовий сезон значень підземного стоку до річки з ділянки 1 (1) та лівобережної частини водозбору р. Південний Буг — ділянки 2 (2) із сумою атмосферних опадів та температурою

Fig. 9. Comparison by stages of dynamics of average for the winter season values of underground runoff to the river from site 1 (1) and the left-bank part of the catchment area of the Pivdennyi Buh River — site 2 (2) with the sum of precipitation and temperature

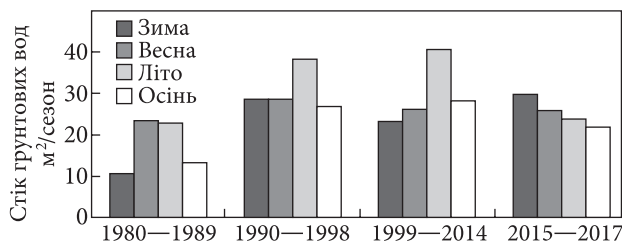


Рис. 10. Динаміка питомого середньосезонного по виділених етапах стоку ґрунтових вод до р. Південний Буг з лівобережного водозбору в м. Хмельник (ділянка 2)

Fig. 10. Dynamics of specific average seasonal according to the selected stages of groundwater runoff to the Pivdennyi Buh River from the left-bank watershed in Khmilnyk (site 2)

їх циклічностей — близько восьми років (Shevchenko et al., 2020), а починаючи з 1997 р. — повна синхронізація циклів температури та стоку ґрунтових вод.

На графіку (рис. 9) також добре видно, що коливання підземного зимового стоку до річки на ділянці 2 добре корелюють із середньою зимовою температурою повітря і майже ніяк — із сумою зимових опадів.

Крім зростання зимового стоку (див. рис. 4, в), що виводить його приблизно з 2008 р. на домінуючі позиції над весняним, до 2014 р. зростали також літній та певною мірою осінній стоки до річки. Підземний стік за літній період формується переважно за рахунок опадів весняного і зимового сезонів і відіграє вирішальну роль у формуванні загального підземного стоку за рік та літнього стоку річок. Влітку під-

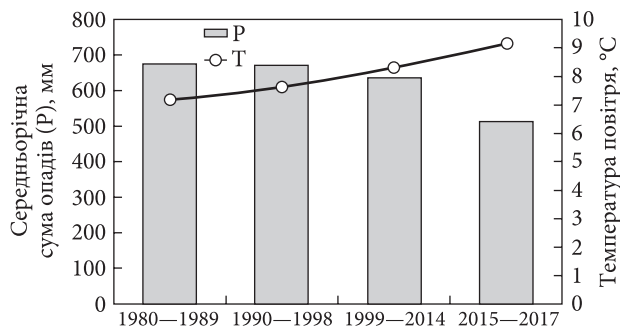


Рис. 11. Зміни середньої за етап річної суми опадів і температури по метеостанції Хмельник

Fig. 11. Changes in the stages of the average annual precipitation and temperature at the meteorological station Khmilnyk

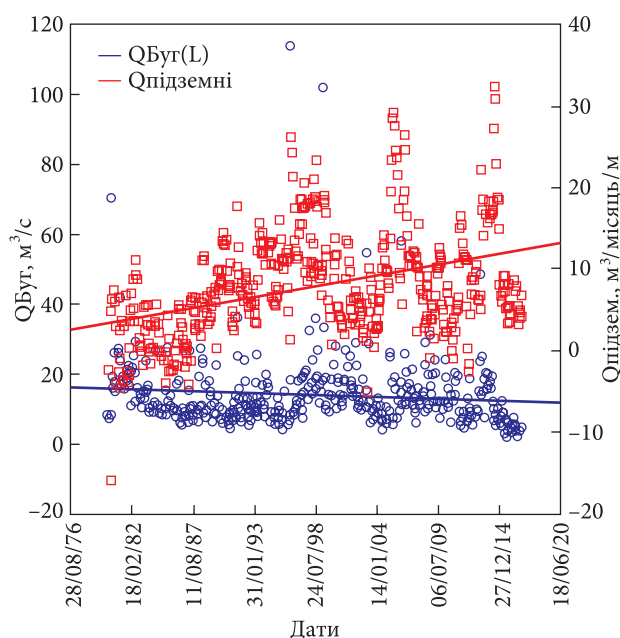


Рис. 12. Багаторічні тренди річкового (Південний Буг) спадаючого та ґрунтового зростаючого стоку з лівобережної частини водозбору на відрізьку річки в м. Хмельник

Fig. 12. Long-term trends of river runoff (Pivdennyi Buh) — decreasing, and groundwater runoff — increasing, for the left bank of the river catchment in Khmilnyk town

земний стік за РГВ 2,5—4,0 м був практично завжди істотно більший, ніж такий восени. Проте з 2009 р. відбувається їх зближення, а іноді й перевищення осіннього стоку над літнім, що зумовлено зростанням інфільтраційного живлення восени та його зменшенням влітку — внаслідок зменшення літніх опадів, особливо у 2015—2017 рр. до 125 мм, що складає 48,6 % від середньобаторічних опадів літнього сезону

1999—2014 рр., а також у результаті істотного зростання літніх температур починаючи з 1999 р. Другий за обсягами (після 2005 р.) за усі роки підземний стік у 2014 р. (значною мірою за рахунок літнього стоку, коли перепад рівнів ґрунтових та поверхневих вод був найбільшим) та значне падіння РГВ у 2015 р. (до 93 % забезпеченості) є доказом суттєвої ролі суми літніх опадів та показовою ознакою *виснаження ємнісних запасів ґрунтових вод*, що врешті рещт призвело до зменшення витрат ґрунтових вод у 2015—2016 рр. по усіх сезонах, крім зимового (рис. 10).

Посилення впливу температури після 1998 р. (див. рис. 8, б) виражається як у періодичному сприянні живленню ґрунтових вод внаслідок зимових відлиг, так і їх виснаженню в результаті випаровування. До речі, при об'єднанні етапів (1980—2016 рр.) значення стандартизованого коефіцієнта, що виражає вплив температури у лінійному рівнянні, зростає до 6,06.

Варто зазначити (рис. 11), що збільшення температури має не лінійний, а більш крутий експоненційний тренд, що підтверджує наші розрахунки (Shevchenko, Bublias', 2018). Вплив потепління на запаси та ресурси ґрунтових вод має не лише прямий характер, але й опосередкований — через зменшення кількості атмосферних опадів (див. рис. 11), збільшення бічного відпливу до річок, збільшення тріщин у пересохлих ґрунтах зони аерації та створення умов для інфлюації літніх зливових опадів. Проте реакція підземного стоку на зменшення або збільшення кількості атмосферних опадів є дуже уповільненою, навіть у порівнянні з реакцією РГВ, про що свідчить відсутність тісного зв'язку між ними (див. рис. 3, 8 та графіки на рис. 7, 9 і 10).

Підземний і річковий стоки за великий проміжок часу змінюються в протилежних напрямках (рис. 12), оскільки режимоформуючі чинники — температура та опади, мають на них різнознаковий вплив (Шевченко и др., 2019): зростання температури холодного періоду призводить до збільшення стоку ґрунтових вод і зменшення річкового стоку весною. Очевидно, що підземний стік збільшується внаслідок перехоплення частини поверхневого стоку, а саме талого весняного стоку.

Витрати поверхневого стоку р. Південний Буг на ділянці Лелітка—Хмільник за період

2011—2020 рр. падали, по-перше, внаслідок зменшення річної суми опадів; по-друге — скорочення стоку неглибокозалягаючих (0,5—1,5 м) ґрунтових вод до малих приток Південного Бугу (розглянуто вище на прикладі р. Згар) і, відповідно, зниження витрат цих річок; по-третє — зменшення припливу ґрунтових вод упродовж літнього сезону на ділянках з відсутнім напірним живленням вздовж самого Південного Бугу (за аналогією з ділянкою 2, рис. 5, б і 10). Після 2010 р. відбувається також незначне зменшення припливу до річок напірних вод другого від поверхні водоносного горизонту в корі вивітрювання кристалічних порід.

Отже, наші висновки цілком кореспондуються з висновками інших дослідників для близьких за кліматичними умовами територій (Dubois et al., 2021). Найближчим часом, після спаду 2015—2020 рр. (який може продовжуватись), в разі збільшення кількості атмосферних опадів з початком багатоговодного циклу у 2021 р. не слід очікувати помітного зростання витрат підземного стоку до річок унаслідок попереднього виснаження горизонтів ґрунтових вод та у зв'язку з дуже повільними темпами відновлення їх запасів, подальшого зростання літніх температур (Паламарчук та ін., 2010), зменшення віддачі з напірних горизонтів, зростання рівнів води в річках (створення підпорів для ґрунтових вод).

Висновки

Для верхньої частини водозбору р. Південний Буг виділено закономірності підземного стоку в річку, які відображають багаторічний наростаючий вплив змін клімату, насамперед зростання температури повітря. Двома різними методами доведено, що вплив температури на зміни обсягів стоку ґрунтових вод до річок домінує над впливом інших режимоформуючих чинників на ділянках поза межами впливу річок та незначним або відсутнім напірним живленням. Повна синхронізація циклів температури, інфільтраційного живлення та стоку ґрунтових вод при РГВ 2,5—4,0 м спостерігається з 1997 р. Після цього зимовий стік ґрунтових вод до річок почав домінувати над весняним, а з 2015 р. — серед усіх сезонів року. До 2014 р. провідну роль у річному циклі відіграв стік літньої пори. Вплив підвищення тем-

ператури повітря на динаміку підземного стоку проявляється спочатку у зростанні живлення напірного горизонту (здебільшого в зимовий період за відсутності промерзання ґрунту), а згодом — зростанні витрат з нього переважно у зимовий та літній сезони. Після 2010 р. живлення напірного горизонту зменшується. З 2011 р. також скорочуються витрати напірних вод до річок із горизонтів малої потужності (3—4 м).

Збільшення підземного стоку в маловодні періоди (літній пік 2003 р., літні та річні 2011 і 2014 рр.) звичайно пов'язані із створенням значних градієнтів стоку між підвищеними РГВ у прирічковій зоні та рівнями води в річці, які, на відміну від РГВ, швидко реагують на брак опадів. Те, що динаміка підземного стоку до річок лишалася тривалий час характерною

як для багатоводних циклів, а РГВ та сума опадів підпорядковані (на різних ділянках з 2004—2011 рр.) закономірностям маловодної стадії, проявляє спрацювання запасів ґрунтових вод за відсутності їх компенсації достатнім інфільтраційним живленням. Спостерігається прогресуюче зменшення питомих витрат ґрунтових вод до річок, а відповідно і їх ресурсів насамперед для горизонтів у верхів'ях річок з РГВ 0,5—1,5 м з відсутнім напірним живленням.

Виділення домінуючих чинників формування режиму для різних ландшафтних умов та РГВ дозволить не лише виконувати прогнози, а й диференціювати територію басейнів за стійкістю до виснаження запасів та ресурсів ґрунтових вод, встановити напрямки протидії поглибленню «гідрогеологічної та гідрологічної посухи».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Вольфцун І.Б. Расчеты элементов баланса грунтовых вод. Ленинград: Гидрометеиздат, 1972. 272 с.
- Осадчий В.І., Бабіченко В.М., Набиванець Ю.Б., Скринник О.Я. Динаміка температури повітря в Україні за період інструментальних метеорологічних спостережень. Київ, 2013. 306 с.
- Степаненко С.М., Польовий А.М., Лобода Н.С. Кліматичні зміни та їх вплив на сфери економіки України. Одеса, 2015. 520 с.
- Паламарчук Л.В., Гнатюк Н.В., Краковська С.В., Шедемко І.П., Дюкель Г.О. Сезонні зміни клімату в Україні в XXI столітті. *Наук. пр. УкрНДГМІ*. 2010. Вип. 259. С. 104—119.
- Шевченко А.Л., Наседкин И.Ю. Естественно-антропогенные особенности формирования водообмена и распространения радиоактивных веществ на мелиоративных системах гумидной зоны. *Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа*. Киев: Карбон ЛТД, 2001. Ч. 1. С. 162—232.
- Шевченко А.Л., Осадчий В.І., Чарний Д.В. Изменения режима, баланса и ресурсов подземных вод Полесья и Лесостепи Украины под влиянием глобального потепления. *Вуочонья записки Бреськага універсітэта*. 2019. Вып. 15, ч. 2. С. 117—128.
- Шевченко О.Л., Чарний Д.В., Шум І.П., Осадчий В.І. Загрози для ресурсів підземних вод, викликані глобальним потеплінням клімату. *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування: матеріали 6-ї міжнар. наук.-пр. конф.* (7—11 жовт. 2019 р., м. Трускавець). Київ, 2019. Т. 2. С. 286—290.
- Deng S., Chen T., Yang N., Qu L., Li M., Chen D. Spatial and temporal distribution of rainfall and drought characteristics across the Pearl River basin. *Sci. Total Environ.* 2018. Vol. 619. P. 28-41.
- Dubois E., Larocque M., Gagné S. Using a water budget model to anticipate the impact of climate change on groundwater recharge at the regional scale in cold and humid climates — example of southern Quebec (Canada), EGU General Assembly 2021, online, April 19-30, 2021, EGU21-6039. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6039>, 2021
- Grossmann A., Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM J. Math. Anal.* 1984. Vol. 15. P. 723-736.
- Karahan H., Ayvaz M.T. Groundwater parameter estimation by optimization and dual reciprocity finite differences method. *Journal of Porous Media*. 2005. Vol. 8 (2). P. 211-223.
- McDonald M.G., Harbaugh A.W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. In *Techniques of Water-Resources Investigations, Series Number 06-A1*. U.S. Geological Survey Publication, 1988. 586 p.
- Pozzi, W., Sheffield, J., Stefanski, R., Cripe, D., Pulwarty, R., Vogt, J.V., Heim, Jr. R.R., Brewer, M.J., Svoboda, M., Westerhoff, R., Van Dijk, J.M., Lloyd-Hughes, B., Pappenberger, F., Werner, M., Dutra, E., Wetterhall, F., Wagner, W., Schubert, S., Kingtse Mo, Nicholson, M., Bettio, L., Nunez, L., VanBeek, R., Bierkens, M., Goncalves de Goncalves, G.L., Gerd Zellde Mattos, J., Lawford, R. Toward Global Drought Early Warning Capability: Expanding International Cooperation for the Development of a Framework for Monitoring and Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2013. Vol. 94. P. 776-785.

- Shevchenko O., Bubljas' V. Global challenges to the system of state hydrogeological monitoring. XII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment" (November 13-16, 2018). Kyiv, Ukraine, 2018. P. 1-5.
- Shevchenko O., Osadchiy V., Charnyi D., Onanko Y., Grebin V. Influence of global warming on the groundwater resources of the Southern Bug River basin. EAGE Geoinformatics 2019: Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, May 13-16, 2019). Conference Paper. art. no. 15890. Kyiv, Ukraine, 2019. P. 1-5. doi:10.3997/2214-4609.201902071
- Shevchenko O., Skoribun A., Charnyi D. Seven-year cyclicity manifestations in groundwater mode revealed by wavelet analysis. EAGE Geoinformatics 2020: Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, May 11-14, 2020) Proceedings, art. no. 18148. Kyiv, Ukraine, 2020. P. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo005>
- STATISTICA (2018). Access mode: <http://www.statsoft.com/USA>
- Taylor R.G., Scanlon B., Döll P., Rodell M., Van Beek R., Wada Y., Longuevergne L., Leblanc M., Famiglietti J.S., Edmunds M., Konikow L., Green T.R., Chen J., Taniguchi M., Bierkens M.F.P., Macdonald A., Fan Y., Maxwell R.M., Yecheili Y., Gurdak J.J., Allen D.M., Shamsudduha M., Hiscock K., Yeh P.J.-F., Holman I., Treidel H. Groundwater and climate change. *Nature Climate Change*. 2013. No. 3. P. 322-329. doi:10.1038/nclimate1744

Надійшла до редакції 15.07.21

Надійшла у ревізованій формі 01.08.21

Прийнята 01.08.21

REFERENCES

- Deng, S., Chen, T., Yang, N., Qu, L., Li, M., Chen, D. (2018). Spatial and temporal distribution of rainfall and drought characteristics across the Pearl River basin. *Sci. Total Environ*, 619, 28-41.
- Dubois, E., Larocque, M., and Gagné, S. (2021). Using a water budget model to anticipate the impact of climate change on groundwater recharge at the regional scale in cold and humid climates — example of southern Quebec (Canada), EGU General Assembly 2021, online, April 19-30, 2021, EGU21-6039. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6039>
- Grossmann, A., Morlet, J. (1984). Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM. J. Math. Anal.*, 15, 723-736.
- Karahan, H., Ayyaz, M.T. (2005). Groundwater parameter estimation by optimization and dual reciprocity finite differences method. *Journal of Porous Media*, 8 (2), 211-223.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W. (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. In *Techniques of Water-Resources Investigations, Series Number 06-A1*. U.S. Geological Survey Publication, 586 p.
- Osadchiy, V.I., Babichenko, V.M., Nabyvanets, Yu.B., Skrynnyk, O.Ya. (2013). Dynamics of air temperature in Ukraine during the period of instrumental meteorological observations. Kyiv (in Ukrainian).
- Palamarchuk, L.V., Hnatyuk, N.V., Krakovskaya, S.V., Shedemenko, I.P., Dyukel, G.O. (2010). Seasonal climate change in Ukraine in the XXI century. *Scientific Proceedings of UkrNDGMI*, 259, 104-119 (in Ukrainian).
- Pozzi, W., Sheffield, J., Stefanski, R., Cripe, D., Pulwarty, R., Vogt, J.V., Heim, Jr. R.R., Brewer, M.J., Svoboda, M., Westerhoff, R., Van Dijk, J.M., Lloyd-Hughes, B., Pappenberger, F., Werner, M., Dutra, E., Wetterhall, F., Wagner, W., Schubert, S., Kingtse Mo, Nicholson, M., Bettio, L., Nunez, L., VanBeek, R., Bierkens, M., Goncalvesde Goncalves, G.L., Gerd Zellde Mattos, J., Lawford, R. (2013). Toward Global Drought Early Warning Capability: Expanding International Cooperation for the Development of a Framework for Monitoring and Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94, 776-785.
- Shevchenko, O., Bubljas' V. (2018). Global challenges to the system of state hydrogeological monitoring. XII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment" (November 13-16, 2018), Kyiv, Ukraine. Conference Paper. 1-5.
- Shevchenko, O.L., Charny, D.V., Shum, I.P., Osadchiy, V.I. (2019). Threats to groundwater resources caused by global warming. Subsoil use in Ukraine. Investment prospects: Materials 6th International Scientific-Practical Conference (October 7-11, 2019). Kyiv, 2, 286-290 (in Ukrainian).
- Shevchenko, A.L., Nasedkin, I.Yu. (2001). Natural and anthropogenic features of water exchange formation and distribution of radioactive substances on reclamation systems of the humid zone. Water exchange in hydrogeological structures and the Chernobyl disaster. Part 1. Kyiv: Carbon LTD, 162-232 (in Russian).
- Shevchenko, A.L., Osadchiy, V.I., Charny, D.V. (2019). Changes in the regime, balance and resources of groundwater in Polesie and forest-steppe of Ukraine under the influence of global warming. *Vuchonyia zapiski Brestskaga universiteta*, 15 (2), 117-128 (in Russian).
- Shevchenko, O., Osadchiy, V., Charny, D., Onanko, Y., Grebin, V. (2019). Influence of global warming on the groundwater resources of the Southern Bug River basin. EAGE Geoinformatics 2019: Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, May 13-16, 2019). Conference Paper. art. no. 15890. Kyiv, Ukraine. 1-5. doi:10.3997/2214-4609.201902071
- Shevchenko, O., Skoribun, A., Charny, D. (2020). Seven-year cyclicity manifestations in groundwater mode revealed by wavelet analysis. EAGE Geoinformatics 2020: Theoretical and Applied Aspects (Kyiv, May 11-14, 2020). Proceedings, art. no. 18148. Kyiv, Ukraine. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo005>
- STATISTICA (2018). Access mode: <http://www.statsoft.com/USA>

- Stepanenko, S.M., Poliovyi, A.M., Loboda, N.S. (2015). Climate change and its impact on the economy of Ukraine. Odesa. <http://odeku.edu.ua/wp-content/uploads/klimatichni-zmini-close.pdf> (in Ukrainian).
- Taylor, R.G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., VanBeek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T.R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M.F.P., Macdonald, A., Fan, Y., Maxwell, R.M., Yechieli, Y., Gurdak, J.J., Allen, D.M., Shamsudduha, M., Hiscock, K., Yeh, P.J.-F., Holman, I., Treidel, H. (2013). Groundwater and climate change. *Nature Climate Change*, 3, 322-329. doi:10.1038/nclimate1744
- Wolfstun, I.B. (1972). Calculations of the elements of the balance of groundwater. Leningrad: Gidrometeoizdat (in Russian).

Received 15.07.21
Received in revised form 01.08.21
Accepted 01.08.21

O.L. Shevchenko ^{1*}, D.V. Charny ², V.I. Osadchi ¹, A.O. Il'chenko ¹

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: shevch62@gmail.com; osad@uhmi.org.ua; nastianastia@i.ua

²Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: dmitriych10@gmail.com

* Corresponding author

GROUNDWATER RUNOFF IN THE PIVDENNYI BUH RIVER BASIN IN CONDITIONS OF GLOBAL WARMING

This paper analyses changes in the calculated values of the specific runoff of unconfined and confined groundwaters to the rivers Pivdennyi Buh (Khmilnyk town) and Zhar (a tributary of the Pivdennyi Buh; Vinnytsia and Khmelnytsky regions) by seasons and long-term stages, for a total of 38 years (1980-2017). Regularities of seasonal changes in groundwater runoff in areas with different relief and average long-term groundwater levels (0.5-1.5; 0.8-2.5 and 2.7-4.5 m) are revealed. These changes have been shown to be closely related to abnormal air temperature fluctuations. There are four stages of successive changes in the regime of groundwater and in the volume of their runoff to rivers: I. 1980-1989 (1990) — traditionally minimal winter and autumn underground runoff, moderate summer and predominant spring runoff, dominance of runoff from the area with high GWT; II. 1990-1998 — growth and advantages of groundwater runoff from the area with low GWT, reduction to the long-term minimum of groundwater runoff in the area with high GWT (0.8-2.5 m); III. From 1999 to 2014 — the predominant dominance of winter runoff over spring, slow growth of groundwater runoff in a limited area of the catchment with levels of 0.8-2.5 m; high-amplitude fluctuations of runoff and GWT with the achievement of long-term maximums in the area with GWT = 2.5-4.0 m; IV. 2015-2019 — the most intense reduction of GWT, and in the upper reaches of small rivers — of underground runoff to rivers.

There is a progressive decrease in the specific flow of groundwater to rivers, and consequently of their resources — primarily for the aquifers in the upper reaches of rivers with GWT 0.5-1.5 m with no pressure recharge. Aquifers of groundwater fed by confined aquifers (mainly within floodplains and the first low terraces of rivers) in the studied area of the Ukrainian massif of fracture waters have greater stability of the level regime on the background of rising temperatures and decreasing precipitation (recorded by 2020) than shallow water (0.5-2.0 m) without signs of such recharge.

Keywords: groundwater; groundwater runoff; rate of groundwater discharge; groundwater regime; groundwater level (GWT), air temperature, seasonal changes, cyclicity, resources, infiltration recharge.