

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

В.В. Шкляренко

ORCID: 0009-0002-9866-558X;
vfkshkl@ukr.net

О.Л. Шевченко

ORCID: 0000-0002-5791-5354;
shevch62@gmail.com

О.А. Щеглов

ORCID: 0000-0001-5702-6285;
Aleshcheglov@gmail.com

Український гідрометеоро-
логічний інститут
Державної служби України
з надзвичайних ситуацій
та Національної академії наук
України, м. Київ, Україна

УДК 556.324:551.577.38

DOI: <https://doi.org/10.15407/Meteorology2025.07.098>

РОЗПІЗНАННЯ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ПОСУХ ЗА ІНДЕКСАМИ SPI І SGI В БАСЕЙНІ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ

Очевидно, що гідрогеологічна посуха обумовлюється метеорологічною посухою та спричинена зменшенням живлення підземних вод і збільшенням їх витрат. Проте остаточно не доведено який саме чинник є більш впливовим або визначальним: підвищення температури, зменшення кількості опадів, дефіцит атмосферної вологості, зниження рівня води в річках тощо. У статті висвітлено метод ідентифікації гідрогеологічної посухи на основі аналізу індексів SGI та підтвердження метеорологічної посухи. За ретроспективними даними визначено таку тривалість останньої, якої достатньо для прояву значної та тривалої рецесії в режимі рівня ґрунтових вод. При цьому проаналізовано глибини рівня ґрунтових вод (РГВ), чутливі до впливу метеорологічної посухи. Виявлено просторові і часові закономірності прояву посушливих явищ, а також визначено ступінь інерційності реакції рівня ґрунтових вод на кліматичні зміни та метеорологічні явища. Аналіз виконано за даними гідрогеологічних спостережень по свердловинах державного моніторингу в басейні річки Південний Буг шляхом розрахунку та зіставлення індексів SPI (стандартизований індекс опадів) та SGI (стандартизований індекс ґрунтових вод). Для цього було побудовано ряд карт SPI та SGI за 2016 рік із використанням методу сплайн-інтерполяції у середовищі ArcMap, а також проведено аналіз багаторічної динаміки SGI за період 1980–2021 рр. на основі даних спостережень за РГВ по дев'яти моніторингових свердловинах. Результати показали просторову кореляцію між індексами, однак зі зсувом у часі: найбільш інтенсивна метеорологічна посуха зафіксована в липні–вересні, тоді як максимальне зниження рівнів ґрунтових вод спостерігалося у серпні–жовтні. Проведений аналіз дозволив виділити найбільш уразливі до посухи райони центральної частини басейну та обґрунтувати доцільність поєднання індексів SPI та SGI для моніторингу стану водних ресурсів. Запропонований підхід може слугувати основою для створення регіональної системи раннього попередження гідрогеологічної посухи та адаптивного управління підземними водами в умовах зміни клімату.

Ключові слова: гідрогеологічна посуха, стандартизовані індекси, SPI, SGI, басейн річки Південний Буг, моніторинг посух, часовий лаг, інтерполяція, рівні підземних вод, метеорологічна посуха, чинники.

ВСТУП

Україна, як і більшість країн Європи, відчуває на собі наслідки зміни клімату, зокрема, зростання частоти та інтенсивності посушливих періодів, аномальні коливання температури та незвичний розподіл опадів протягом року. У контексті глобальних кліматичних змін, що супроводжуються зростанням частоти і тривалості екстремальних погодних явищ, зокрема посух, питання оцінки кількісних змін водних ресурсів заслуговує на особливу увагу. Ця проблема потребує уваги у першу чергу в регіонах із розвиненим агропромисловим комплексом і високим навантаженням на водні ресурси, таких як басейн річки Південний Буг. У зв'язку з цим

зростає потреба у створенні інструментів, які дозволяють не лише підтверджувати атмосферні (метеорологічні) посухи, а й оцінювати ступінь їхнього впливу на підземні води — стратегічний ресурс для забезпечення населення і економіки країни. У цій роботі зроблено спробу поєднати метеорологічні та гідрогеологічні індекси, щоб надати цілісну картину стану водного середовища в умовах кліматичної нестабільності. Автори вважають, що саме вивчення інерційності реакції підземних вод на атмосферні збурення за різної початкової глибини залягання рівня, дозволяє глибше зрозуміти адаптаційний потенціал водоносних систем, що набуває особливої ваги в умовах водного дефіциту.

Посуха — це складне природне явище, яке проявляється на різних рівнях гідрометеорологічної системи: від зменшення кількості опадів до порушень у водному балансі ґрунтів, річок і водоносних горизонтів (Mishra & Singh, 2010). Проте наразі не виділяється окреме поняття “гідрогеологічної посухи”. Воно досі входить до загальнішого терміну “гідрологічна посуха”, хоча починається і закінчується це явище пізніше. Гідрогеологічна посуха являє собою тривале зниження рівнів підземних вод, що є наслідком дефіциту атмосферного живлення але має складні механізми прояву, які залежать від геологічних умов і структури водоносних систем (Van Lanen et al., 2013).

Для кількісної оцінки метеорологічних посух широко застосовується стандартизований індекс опадів (SPI), запропонований McKee et al. (1993). Цей індекс ґрунтується на статистичному аналізі відхилень суми опадів за вибраний часовий інтервал (1, 3, 6, 12 місяців тощо) від багаторічної норми. Він дозволяє оцінити, наскільки певний період є вологішим або сухішим за середні багаторічні умови. Значення SPI виражається у вигляді стандартизованих відхилень, тобто шкали, де: $SPI = 0$ — відповідає нормальним умовам, $SPI < 0$ — свідчить про посушливі умови, $SPI > 0$ — про надлишкову вологість. Значення SPI нижче -1 вказують на посуху, а нижче -2 — на екстремальну посуху. Перевагою цього індексу є універсальність, простота розрахунку та можливість застосування на різних часових масштабах, що робить його придатним як для короткострокового, так і довгострокового моніторингу кліматичних аномалій.

У свою чергу, проблема оцінки гідрогеологічної посухи тривалий час залишалася методично не вирішеною. Лише у 2013 році Bloomfield і Marchant запропонували аналогічний підхід — стандартизований індекс підземних вод (SGI), який дає змогу виявляти відхилення рівнів ґрунтових вод (PGB) від норми з урахуванням місцевої гідродинаміки (Bloomfield & Marchant, 2013). Індекс SGI обчислюється за принципом, аналогічним до SPI, але замість опадів використовується хронологічний ряд середньомісячних значень рівня підземних вод. Спочатку рівні підземних вод нормалізують, зазвичай за допомогою статистичного розподілу (наприклад, нормального або Пірсона III), після чого їх переводять у шкалу стандартизованих відхилень. Таким чином, значення SGI, що дорівнює 0 відповідає середньому рівню за період спостережень; $SGI < 0$ вказує на пониження рівня (дефіцит живлення); $SGI < -1$ свідчить про початок гідрогеологічної посухи; $SGI < -2$ — екстремальна рецесія. Індекс SGI дозволяє зіставляти аномалії рівня підземних вод у різних сверд-

ловинах, незважаючи на відмінності у абсолютних значеннях, що особливо важливо для територій зі складними гідрогеологічними умовами.

У цій же роботі (Bloomfield & Marchant, 2013) встановлено, що між SPI та SGI існує часовий лаг, тобто затримка у часі між виникненням атмосферної посухи і реакцією рівня підземних вод (від кількох тижнів до кількох місяців), яка залежить від низки чинників. Зокрема, геологічна будова території визначає, наскільки швидко опади можуть проникати в ґрунт і досягати водоносного горизонту: у піщаних або добре тріщинуватих породах цей процес відбувається значно швидше, ніж у глинистих. Тип водоносного горизонту (з вільною поверхнею або напірний) також має значення: у неглибоких водоносних горизонтах зміни рівня настають швидше, тоді як у глибоких або захищених горизонтах реакція може бути дуже уповільненою. Автокореляція часового ряду рівнів підземних вод — це показник того, наскільки поточний рівень залежить від його попередніх значень. Висока автокореляція вказує на інерційність системи, коли навіть суттєві зміни кліматичних умов можуть проявитися у рівнях підземних вод лише через кілька місяців або сезонів. Таким чином, часовий лаг між атмосферою та гідрогеологічною посухами є не лише проявом фізичних характеристик підземного середовища, а й важливим параметром для прогнозування стану водних ресурсів.

Для повноцінного моніторингу і прогнозування впливу посух на природні та антропогенні системи необхідний інтегрований підхід, який охоплює атмосферну, наземну та підземну складові водного балансу. Для обґрунтування та кращого розуміння підпорядкованого, проте самостійного за тривалістю явища гідрогеологічної посухи доцільно поєднувати аналіз SPI із додатковими індексами, зокрема SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010), який враховує не лише опади, але й потенційне випаровування та SGI — індексом рівня підземних (ґрунтових) вод. У дослідженні (Шевченко О.Л. та ін., 2024) було доведено, що інерційність реакції підземних вод на атмосферні збурення (часовий лаг) чітко простежується при порівнянні гідрографів витрат річок і рівнів підземних вод. Це підтверджує доцільність застосування індексу SGI для кількісної оцінки гідрогеологічної посухи в умовах кліматичних змін.

Вивчення гідрогеологічних посух на регіональному рівні засвідчує значну залежність режиму ґрунтових вод від метеорологічних подій. Зокрема, зміни в режимі неглибоких ґрунтових вод в басейні річки Південний Буг проявились з початком глобального потепління в Україні, а саме з 1989–1990 рр. (Шевченко О.Л. та ін., 2021б). Ці зміни

пов'язані не стільки зі змінами кількості опадів, скільки з підвищенням температури повітря. Також виявлено часові лаги між атмосферними збуреннями та реакцією рівнів підземних вод, а також зміни циклічності в поведінці РГВ (Шевченко та ін., 2021), що є важливим контекстом для інтерпретації SGI.

Метою даної роботи є вивчення взаємозв'язку між метеорологічними (SPI) та гідрогеологічними (SGI) посухами у басейні річки Південний Буг для розуміння ступеню залежності змін у режимі підземних вод від кліматичних чинників у сучасних умовах а також доведення ефективності методу індексів SGI для ідентифікації гідрогеологічних посух.

Для її досягнення здійснено аналіз просторових і часових проявів атмосферної та гідрогеологічної посухи, зокрема побудовано та порівняно карти просторового розподілу індексів SPI і SGI за 2016 рік, а також проаналізовано динаміку SGI за багаторічний період (1980–2020) на прикладі 9 спостережних свердловин. Такий підхід дозволяє встановити відмінності в реакції ґрунтових вод в залежності від просторової неоднорідності гідрогеологічних умов, кліматичної зональності та можливих місцевих метеорологічних аномалій, а також оцінити кумулятивний ефект для гідрогеологічного середовища від тривалих метеорологічних подій, у першу чергу посух.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Незважаючи на вагомість басейну р. Південний Буг у забезпеченні загальних водних ресурсів України, регіон залишається недостатньо вивченим у контексті знань про реакцію підземної гідросфери на кліматичні зміни останніх чотирьох десятиліть. Це дослідження націлене на заповнення цієї прогалини.

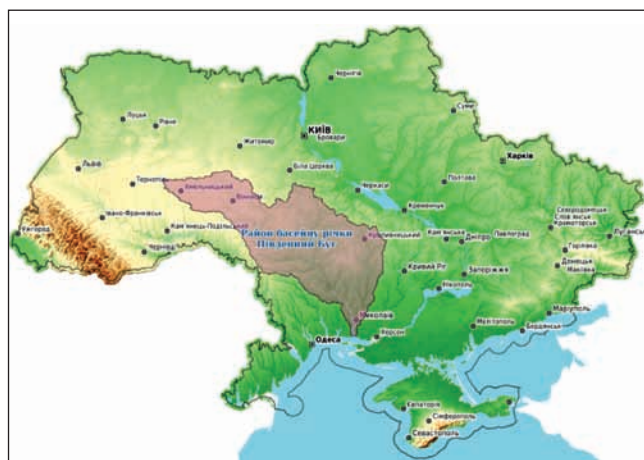


Рис. 1. Межі басейну річки Південний Буг за даними GIS Державного водного кадастру України (2021)

Басейн річки Південний Буг (рис. 1, 2) обрано як об'єкт дослідження у зв'язку з його цілковитою належністю до території України, географічною протяжністю із півночі на південь, що дозволяє розглянути особливості змін режиму ґрунтових вод щонайменше у двох кліматичних зонах. Цей річковий басейн охоплює площу 63,7 тис. км² (10,5% території України) і включає частини 7 адміністративних областей, зокрема Вінницької, Хмельницької, Київської, Черкаської, Кіровоградської, Миколаївської та Одеської (Афанасьєв та ін., 2022).

У межах басейну розташовано близько 9000 водотоків, із яких значна частина має тимчасовий або сезонний характер. Річкова система характеризується складною гідрографічною мережею та наявністю значної кількості водосховищ і ставків (понад 3000), що істотно впливають на гідрологічний режим річки.

Територія річкового басейну Південного Бугу простягається через три гідрогеологічні регіони (рис. 3): Волино-Подільський артезіанський басейн (у північно-західній частині), Український басейн тріщинних вод кристалічного щита (який займає близько 80% площі), та Причорноморський артезіанський басейн. Основні водоносні горизонти басейну річки Південний Буг зображено на рис. 3. Окрім водоносного горизонту в докембрійських породах фундаменту широке поширення мають водоносні горизонти в неогенових та четвертинних алювіальних відкладах.

Наявність або відсутність живлення перших від поверхні безнапірних водоносних горизонтів напірними водами, а також різні типи проникності водомістких порід впливають, поряд з РГВ, на ступінь стійкості ґрунтових вод до впливу кліматичних чинників. Ці чинники подекуди мають визначальне значення для тривалості часових лагів між SPI та SGI.

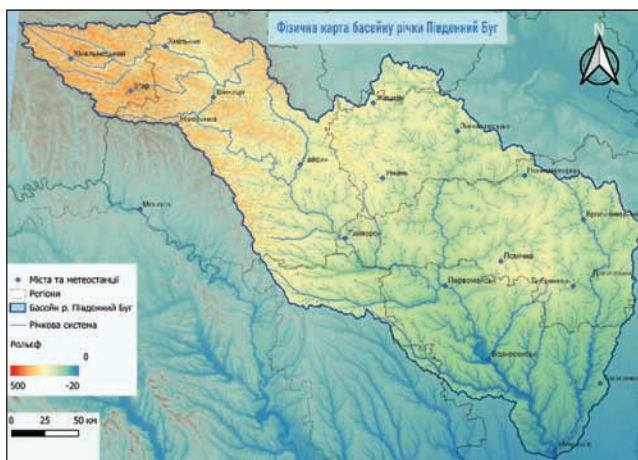


Рис. 2. Фізична карта басейну річки Південний Буг, складено автором в середовищі QGIS

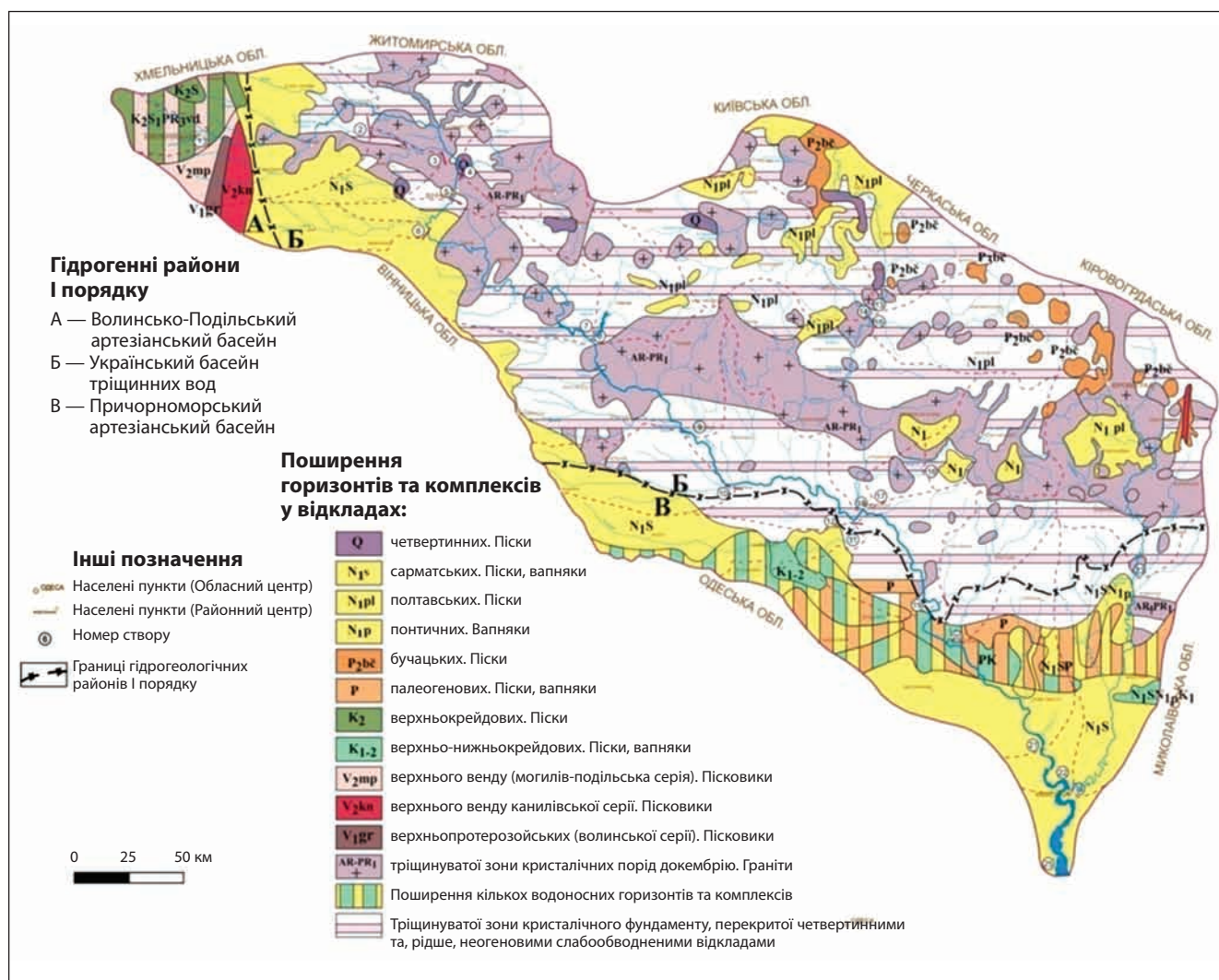


Рис. 3. Гідрогеологічне районування басейну річки Південний Буг

Клімат басейну є помірно континентальним із виразною градієнтністю за середньорічною сумою річних опадів з півночі на південь, відповідно, від 669 до 410 мм, що є важливим у контексті дослідження посухових явищ. Басейн є вразливим до змін клімату, які останні 30 років проявляються через зростання частоти посух, зниження запасів вологи у ґрунті та зменшення інфільтраційного живлення підземних вод (Шевченко та ін., 2023). Динаміку розвитку та тривалість посухи можна прослідкувати також за щомісячними знімками з супутників GRACE-FO (рис. 4), за якими добре видно, що осередок мінімальних запасів вологи в верхньому шарі ґрунту та зниження РГВ здебільшого локалізується саме в південно-західній частині України, де і розташований басейн р. Південний Буг (рис. 4).

Як бачимо, територія басейну за всіма ознаками потребує першочергових досліджень щодо ідентифікації та попередження тривалих гідрогеологічних

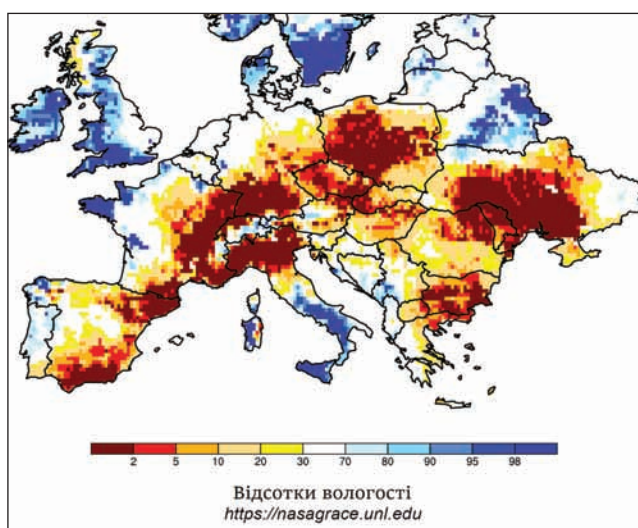


Рис. 4. Розподіл територій за індикатором посухи неглибоких ґрунтових вод станом на 24 квітня 2023 року за супутниковими даними GRACE-FO NASA

посух, що робить метод (критерій) індексів SGI та SPI вельми актуальним.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для розрахунку стандартизованого індексу опадів (SPI) були використані архівні дані щомісячних сум атмосферних опадів із метеорологічних станцій, розташованих у межах басейну річки Південний Буг або прилеглих до нього. Усього було опрацьовано дані з понад 20 метеостанцій, серед яких: Хмільник, Хмельницький, Умань, Помічна, Первомайськ, Новомиргород, Могилів, Миколаїв, Кропивницький, Згар, Звенигородка, Жмеринка, Жашків, Долинська, Гайсин, Гайворон, Вознесенськ, Вінниця, Бобринець, Баштанка (див. *рис. 2*). Дані охоплюють проміжок часу від 1980-го до 2020-го року. Основними джерелами даних були: національні кліматичні архіви Укргідрометцентру, публічно доступні бази даних, зокрема Land&Water — Агро-гідрологічна модель річкових басейнів України. Надалі ці ряди даних використовувалися для просторової інтерполяції та побудови карт SPI у середовищі QGIS та ArcMap.

Для оцінки атмосферної посухи було застосовано стандартизований індекс опадів (SPI), розроблений McKee et al. (1993). Цей індекс дозволяє оцінити відхилення кількості опадів за обраний часовий інтервал відносно багаторічної норми, стандартизуючи їх у вигляді відхилень на шкалі нормального розподілу.

Методика McKee передбачає апроксимацію суми опадів за допомогою гамма-розподілу із подальшим перетворенням його у нормальний розподіл для стандартизації. Зокрема, сума опадів P за певний місяць підганяється під гамма-розподіл із параметрами α і β , після чого її кумулятивна ймовірність трансформується у відповідне значення SPI через функцію зворотного нормального розподілу.

У цьому дослідженні використовувався спрощений статистичний підхід, який передбачає розрахунок SPI за формулою стандартизації:

$$SPI_i = \frac{P_i - \bar{P}}{S_p}, \quad (1)$$

де P_i — сума опадів за місяць i ; $\bar{P}$ — середня сума опадів за цей місяць протягом усього періоду спостережень; S_p — стандартне відхилення суми опадів, яке обчислюється за класичною формулою:

$$S_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}, \quad (2)$$

де n — кількість років спостережень.

Ця формула враховує відхилення кожного значення опадів від середнього та дозволяє кількісно

оцінити ступінь їхньої дисперсії. Для обчислень у Microsoft Excel використовувалася функція STDEV.

Для оцінки гідрогеологічної посухи та обчислення індексу SGI було використано багаторічні ряди спостережень за рівнями підземних вод по моніторингових свердловинах на території басейну річки Південний Буг. Загалом було відібрано 13 свердловин, розташованих на території Вінницької, Хмельницької, Одеської та Миколаївської областей, із більш-менш витриманим рядом спостережень.

Крім верхньої частини басейну, де свердловини розташовані рівномірно, вони тяжіють до південної його частини (*рис. 5*). У меридіональному ж напрямку свердловини розподіляються із близьким кроком, що дозволяє проаналізувати підпорядковану широтній зональності гідродинамічну реакцію різних ділянок водозбору на кліматичні чинники.

Для кожної свердловини було зібрано або вихарувано (за пентадними фактичними вимірюваннями) середньомісячні значення РГВ за доступний період спостережень: від 1980-х років до 2021-го року. Проте довжина рядів відрізняється залежно від початку спостережень, їх тривалості та доступності даних (ДП “Геоінформ” не надає інформацію навіть підпорядкованим ДСНС України організаціям, що є грубим порушенням законодавства). Координати свердловин були уточнені та візуалізовані у середовищі QGIS, що дозволило також проаналізувати їхнє розміщення у рельєфі, по площі поширення водоносного горизонту та визначити приуроченість до водозбору певної малої притоки р. Південний Буг. Такий просторовий розподіл забезпечує певну репрезентативність для вивчення варіативності реакцій водоносних систем басейну Південного Бугу на посухи, хоча очевидно (*рис. 5*), що східна частина басейну (Черкаська та Кіровоградська області) не представлені спостережними свердловинами.

Для кількісної оцінки гідрогеологічної посухи було використано стандартизований індекс підземних вод (SGI), який вперше запропонували Bloomfield & Marchant (2013). Індекс SGI дозволяє виявити відхилення рівнів підземних вод від норми у вигляді стандартизованих значень, аналогічно до SPI, але із урахуванням особливостей поведінки водоносного горизонту.

За оригінальною методикою авторів, SGI обчислюється як статистичне відхилення рівнів підземних вод за обраний місяць (наприклад січень за всі роки вибірки) відносно багаторічного середнього значення, нормоване на стандартне відхилення. Як і у випадку SPI, апіорі передбачається нормальний (або близький до нормального) розподіл рівнів води.

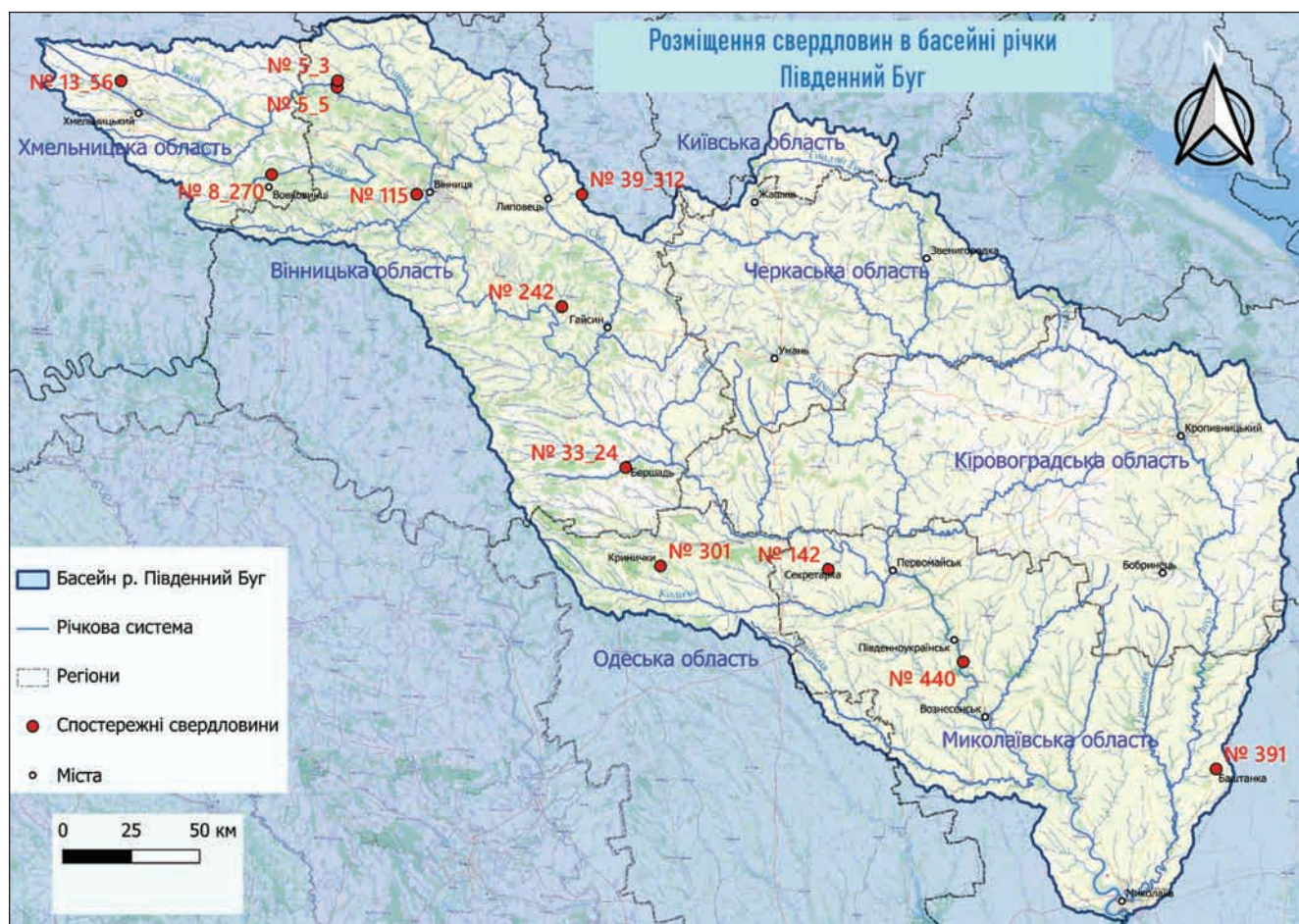


Рис. 5. Розташування свердловин державної моніторингової мережі у басейні річки Південний Буг (враховано свердловини з тривалими, не менше 15 років, спостереженнями)

У нашому дослідженні SGI розраховувався за формулою:

$$SGI_i = \frac{X_i - \bar{X}}{S_x}, \quad (3)$$

де X_i — середній рівень підземних вод за місяць i ; $\bar{X}$ — багаторічний середній рівень підземних вод у відповідному місяці; S_x — стандартне відхилення рівня, обчислене за формулою:

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}, \quad (4)$$

де n — кількість років спостережень.

Наведений спосіб обчислення дозволяє продемонструвати приведену до норми природну змінність рівнів підземних вод для кожного місяця року та забезпечує коректне порівняння широкого діапазону фактичних значень РГВ на різних ділянках у вигляді безрозмірного індексу.

Обидва показники (SPI і SGI) наведені в стандартизованій шкалі, що робить можливим їхнє сумісне використання для просторового аналізу, побудови

карт посухи, а також виявлення часових лагів між метеорологічною посухою і гідрогеологічною відповіддю на неї.

Таке порівняння дозволяє ідентифікувати періоди, коли зменшення кількості опадів супроводжується або не супроводжується зниженням рівнів підземних вод, а також визначити часовий лаг у їхній реакції — важливий показник при вивченні чутливості водоносних горизонтів до кліматичних аномалій.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ (Аналіз динаміки SGI у басейні річки Південний Буг)

Результати опрацювання даних по свердловинах № 5-3 та № 5-5 в м. Хмільник, хоча і не демонструють значної схожості за багаторічними тенденціями у змінах РГВ (рис.6), проте вказують на деяку подібність зі значеннями SGI. У 1980-х роках спостерігалися значні позитивні відхилення SGI (до +3), що свідчить про надлишкове зволоження. Починаючи із середини 1990-х років спостерігається зниження

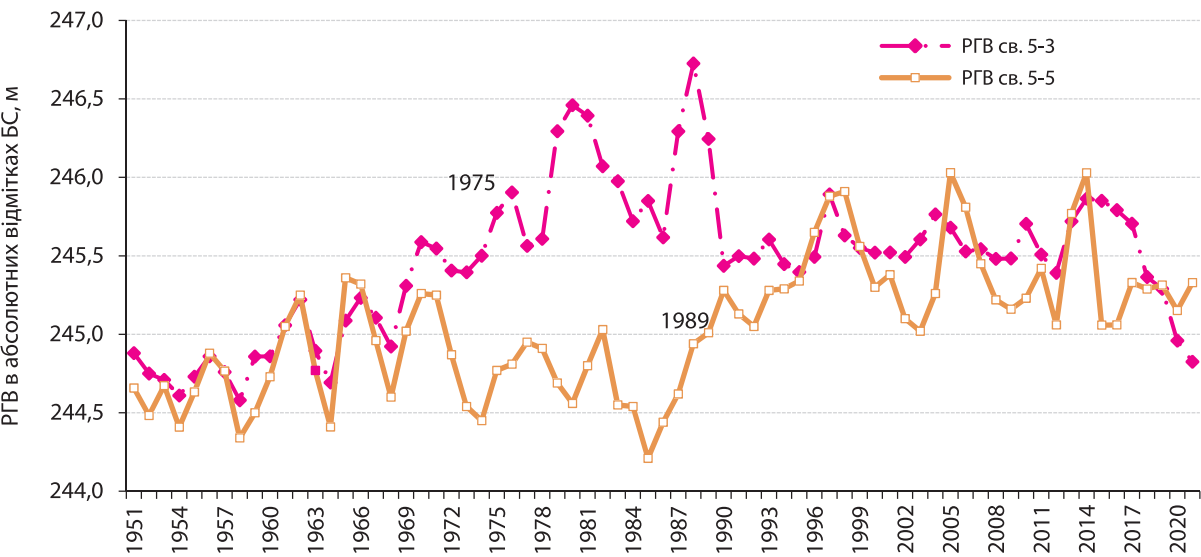


Рис. 6. Хід рівнів ґрунтових вод по свердловинах № 5-3 з РГВ 0,8–2,5 м від поверхні землі та 5-5 з РГВ 2,5–4,5 м (водоносний горизонт у верхньочетвертинних і сучасних алювіальних відкладах), м. Хмільник Вінницької області

значень SGI, особливо помітне в останні роки. На ділянці долини р. Згар (с. Городище), де розміщена свердловина № 8-270, динаміка SGI за вищих РГВ (0,0–2,2 м від поверхні) відзначається меншою амплітудою коливань і стабільністю до середини 2000-х років. Перші посухи ґрунтових вод проявились починаючи із 2007 р. коли індекси знизились до –2. Високі РГВ мають добру реакцію на кліматичні сигнали, хоча з певною інерційністю. Від початку 2007 року рівні демонструють тривалу фазу зниження із численними і тривалими періодами $SGI < -1$ (рис. 7), що вказує на тривалу і стійку рецесію та зменшення запасів ґрунтових вод внаслідок зменшення їх живлення та підвищеного розвантаження у р.Згар у 2005–2006 рр. Проте, найбільш “глибока” і тривала посуха проявилась лише раз — у 2011–2012 рр., коли була низька кількість атмосферних опадів (2011 р.) та впали рівні і витрати води в річці.

Липовець, басейн р. Соб, свердловина № 39/312, безнапірний локально-водоносний горизонт у середньо-верхньочетвертинних еолово-делювіаль-

них відкладах із РГВ переважно в діапазоні 3,0–5,8 м від поверхні, відстань до річки 1140 м. Режим РГВ характеризується чергуванням достатньо тривалих (4,5–5 років) позитивних і негативних фаз SGI. Аномальні і тривалі зниження РГВ, порівнювані із посухою ($SGI \approx -2$), проявились із 1988 по 1991 рр. та у 2011–2013 рр. Загалом після 2009 р. значно переважають від’ємні значення SGI (рис. 8). Ці роки відрізнялись підвищеним бічним відтоком ґрунтових вод до річки, проте низьким інфільтраційним живленням (у 1988 близьке до 0,0, у 1990 і 2011 — від’ємне). Оскільки РГВ здебільшого нижче критичного рівня, режим РГВ на цій ділянці реагує на метеорологічні посухи із значним запізненням. Так само із запізненням реагує РГВ на зниження рівня води у річці. Причини двох гідрогеологічних посух мають комплексний характер.

Наступні три свердловини розташовані значно південніше, на межі із степовою зоною, тому посухи тут проявлялись частіше. Так перші від’ємні значення SGI у зимові місяці за період з 1978р. про-

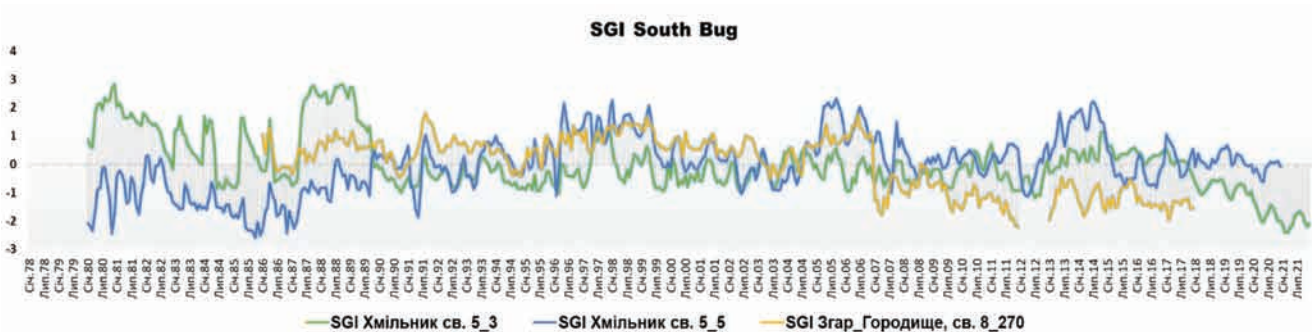


Рис. 7. Динаміка SGI свердловин на ділянках м. Хмільник та с. Городище (долина р. Згар)

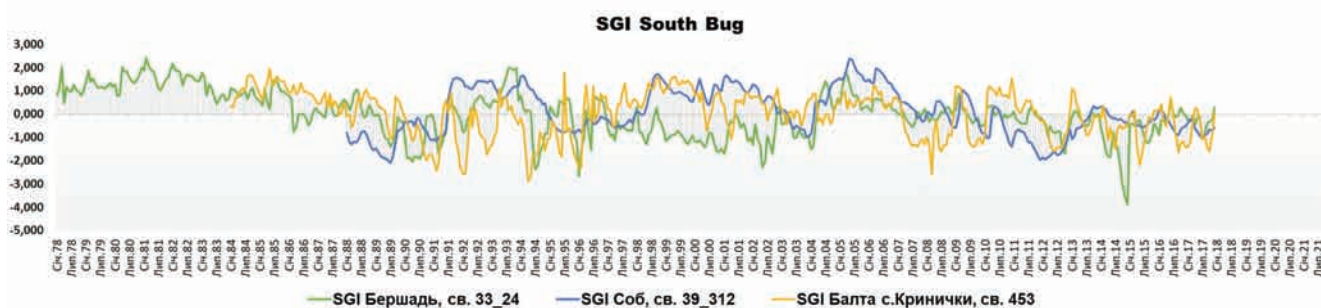


Рис. 8. Динаміка SGI за РГВ в свердловинах в пунктах Бершадь, Липовець (р. Соб) та Балта

явилися для РГВ у свердловині №33/24, що поблизу м.Бершадь, у 1989 р. (рис. 8). Після 1989 р. періоди з від'ємними SGI почастішали протягом усіх сезонів, перше значення менше за -2 з'явилося у квітні 1990 р. У цьому році ми констатували прояв першої гідрогеологічної (для ґрунтових вод) посухи, яка тривала з січня по вересень. Крім неї можна виділити ще три посухи: у 1994 р. — тривала з червня по грудень із мінімумами РГВ і SGI в липні-серпні; 2002 р. — майже увесь рік з січня до жовтня із екстремумом у травні-червні (з передумовою у листопаді і грудні попереднього року); 2014 р. — найглибша, що тривала з січня до грудня, із найнижчими SGI (менше -3) у жовтні-грудні. В останньому випадку гідрогеологічна посуха проявилася із запізненням, оскільки у травні були високі позитивні SPI (>3). Як бачимо, тривалість посух зростала з часом від 9 до 12–13 місяців. Відмітимо також, що виникали значні зниження РГВ і в холодні періоди року, як у 1996 р. — з січня по березень, із передумовами ($SGI < -1$), що були закладені у листопаді-грудні 1995 р. Проте вони не були достатньо тривалими та не мали тісної обумовленості метеорологічними посухами, що не дозволяє класифікувати їх як гідрогеологічні посухи, а скоріше, як циклічні сезонні рецесії РГВ. Свердловина знаходиться приблизно у 45 м від р.Дохна, режим РГВ відноситься до прирічкового, отже гідрогеологічні посухи для цієї ділянки більшою мірою пов'язані з гідрологічними посухами.

Балта (с. Кринички), свердловина № 453, безнапірний локально-водоносний горизонт у нижньо-верхньочетвертинних еолово-делювіальних відкладах, режим схильний, відстань до найближчої дрени — 9 км, середні РГВ $= 0,7 \dots 1,3$ м. SGI демонструє два періоди низькоамплітудних (1984–1990 та 1997–2006 рр.) і два періоди високоамплітудних коливань (відносно певного середнього значення — медіани), що сягають значень від $+2$ до -2 і більше (1990–1996 і 2007–2018). Від початку спостережень (1984 р.) до кінця 1988 р. місячні значення SGI коливались в межах $+1,950 \dots -0,573$, тобто з різницею

2,52 між мінімальним та максимальним значеннями, та максимальною амплітудою між сусідніми сезонами 0,897. У проміжку 1989–2017 рр. різниця між мінімальним та максимальним значеннями SGI досягла 4,465 (найвищі перепади були з вересня 1990 р. по 1996 р. коли амплітуда коливань SGI між сусідніми місяцями досягла 3,61 — літо 1995 р.), що свідчить про високу неусталеність режиму РГВ (рис. 8). Перша посуха для РГВ проявилася з вересня 1990 по квітень 1991 р. (8 місяців), друга — з жовтня 1991 по березень 1992 р. (6 місяців), третя — з березня по грудень 1994 р. (10 місяців). Із 1997 по 2007 р., на фоні переважно додатних значень SGI, амплітуда коливань знову зменшилась: максимальне значення між сусідніми місяцями становило 1,212 (весна 2004 р.). Із квітня 2007 по листопад 2008 р. тривала одна з найдовших посух (20 місяців). Періоди переходу в додатну фазу з листопада 2008 р. мають характер стрімкого підвищення, тобто амплітуди є суттєво вищими, ніж в період 1997–2006 років. Після нетривалого періоду позитивних значень SGI із лютого 2010 по жовтень 2011 р. розпочався сучасний період домінування від'ємних значень SGI. Ідентифіковані на цій ділянці гідрогеологічні посухи мають виключно метеорологічну обумовленість.

Криве Озеро, свердловина № 142. Показники SGI змінюються із малою амплітудою та мають слабку варіативність (рис. 9), що пов'язано з напірністю горизонту, тобто його захищеністю водотривом і слабкою залежністю від динамічних метеорологічних чинників. Тим не менш, після 2006 року, з початком маловодного циклу з тривалими посушливими періодами протягом кожного року, добре проявився тренд поступового зниження SGI, що здебільшого характерно для даних широт степової зони України. Тут ми констатуємо першу тривалу посуху, що охопила напірний, другий від поверхні водоносний горизонт у зоні тріщинуватості архейських і нижньопротерозойських порід (лише за хронологічним графіком РГВ посуху ідентифікувати

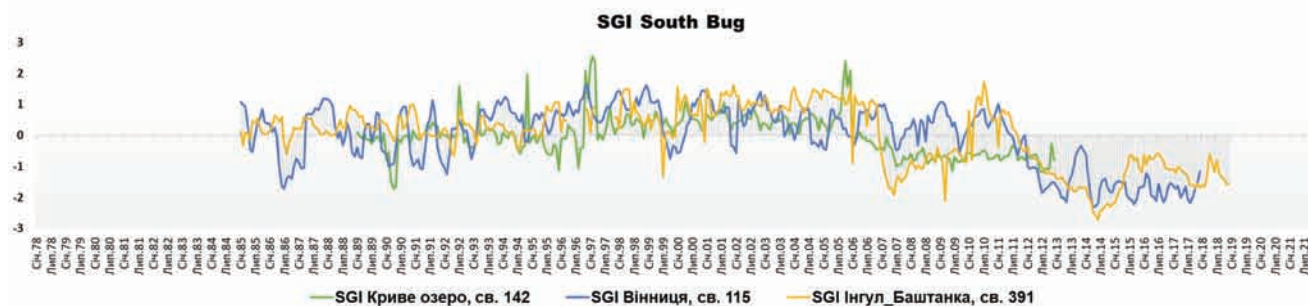


Рис. 9. Динаміка SGI по РГВ у свердловинах на локаціях м.м. Криве Озеро, Вінниця, Баштанка

складно). Оскільки над покрівлю водоносного горизонту лежить 22 м осадових порід, що захищають його від безпосереднього впливу метеорологічних чинників, і в той же час свердловина розташована на відстані близько 150 м від річки, можна констатувати, що гідрогеологічна посуха (тривала рецесія рівнів напірних підземних вод) обумовлена опосередковано метеорологічними чинниками і безпосередньо — *гідрологічним*, тобто зниженням рівня води у річці під впливом достатньо тривалої метеорологічної посухи.

Вінниця, свердловина № 115, безнапірний водоносний горизонт у верхньочетвертинних алювіальних відкладах. Відзначаються три багаторічних періоди коливань SGI: 1985–початок 1993 р. — високоамплітудні коливання із незначним переважанням від’ємних значень; 1993–2011 рр. — значне переважання позитивних значень SGI (рис. 9); кінець 2011–2018 рр. — SGI мають виключно від’ємні значення, що ототожнюється із гідрогеологічною посухою. Оскільки середні багаторічні значення РГВ коливаються вище зональної критичної глибини, а відстань до річки (р. Згар) становить близько 50–60 м, можна визнати цю посуху *метеорологічно* і *гідрологічно* обумовленою. Це доводять високі коефіцієнти парної кореляції між SGI та SPI попереднього місяця літніх сезонів за період 2008–2017 рр., що дорівнюють 0,7...0,75.

Баштанка (басейн р. Інгул), свердловина №391, безнапірний водоносний горизонт в еолово-делювіальних відкладах (суглинки середні) середньогверхнього неоплейстоцену, середньобагаторічні РГВ=0,9...2,8 м, відстань до річки 1,2 км. Починаючи із 2006–2007 рр., спостерігається різке зниження SGI, яке з середини 2011 р. переходить у тривалу рецесію із від’ємними значеннями SGI — гідрогеологічну посуху (рис. 9). Це може свідчити про високу вразливість режиму ґрунтових вод на цій ділянці до кліматичних змін, визначальну роль метеорологічної посухи та другорядну — *гідрологічної* (у зв’язку з достатньою віддаленістю від річки).

Динаміка SGI у басейні р. Південний Буг демонструє як просторову, так і часову неоднорідність. Виявлено режими РГВ із вираженою сезонною реакцією та значними амплітудами коливань SGI (наприклад, св. №№ 5-3, 453, 391), а також РГВ із відносно усталеним режимом (св. №№ 5-5, 39/312). Більшу вразливість до гідрогеологічної посухи проявили водоносні горизонти з прирічковим режимом РГВ, або дренуючим впливом річки та РГВ вищим або близьким до критичного. Як правило це горизонти з РГВ < 2,5 м від поверхні.

ПОБУДОВА КАРТ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ІНДЕКСІВ SPI ТА SGI

Для просторової інтерпретації атмосферної та гідрогеологічної посухи у межах басейну річки Південний Буг було побудовані карти індексів SPI та SGI за 2016 рік — рік, що мав найповніше представлення гідрометеорологічних та гідрогеологічних даних.

Інтерполяція значень SPI (з метеостанцій) і SGI (РГВ по спостережних свердловинах) здійснювалася у середовищі ArcMap за допомогою методу сплайн-інтерполяції (Spline). Даний метод базується на двовимірному алгоритмі мінімальної кривизни поверхні, який створює гладке растрове поле, що точно проходить через задані точки (Z value field). Використовувався варіант REGULARIZED Spline, із параметрами ваги 0.1 та кількістю сусідніх точок — 12.

Інтерпольовані значення були візуалізовані у п’ятиступеневій кольоровій шкалі:

- від -2 і менше — темно-червоний (екстремальна посуха);
- від -1 до -2 — помаранчевий (сильна посуха);
- від -1 до 0 — жовтий (помірна посуха);
- від 0 до 1 — світло-зелений (нормальні умови);
- від 2 і більше — яскраво-зелений (надмірна вологість).

Побудовані карти були обрізані (clipped) за межами басейну Південного Бугу для виключення не-

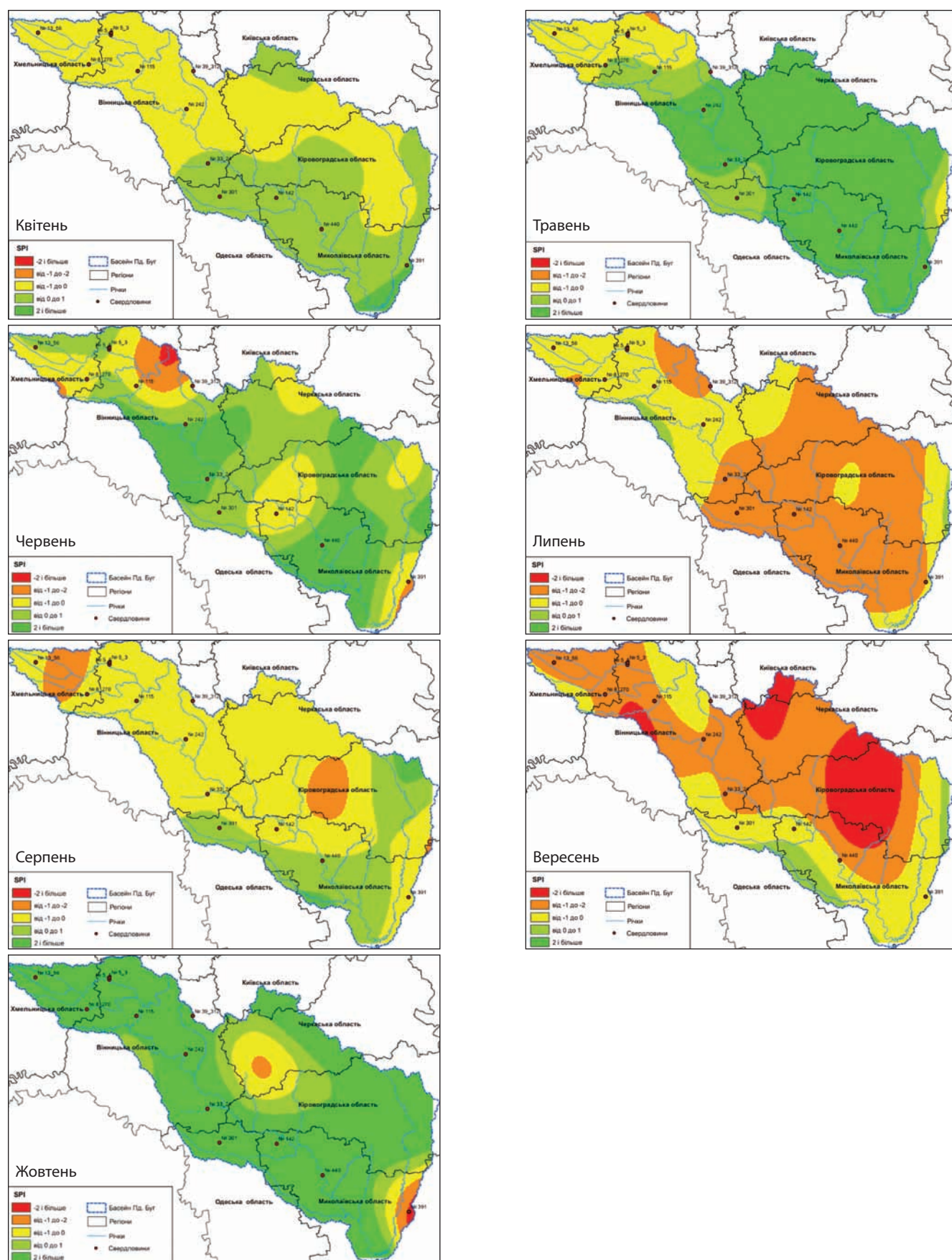


Рис. 10. Карти стандартизованого індексу опадів SPI для басейну р. Південний Буг, 2016 рік

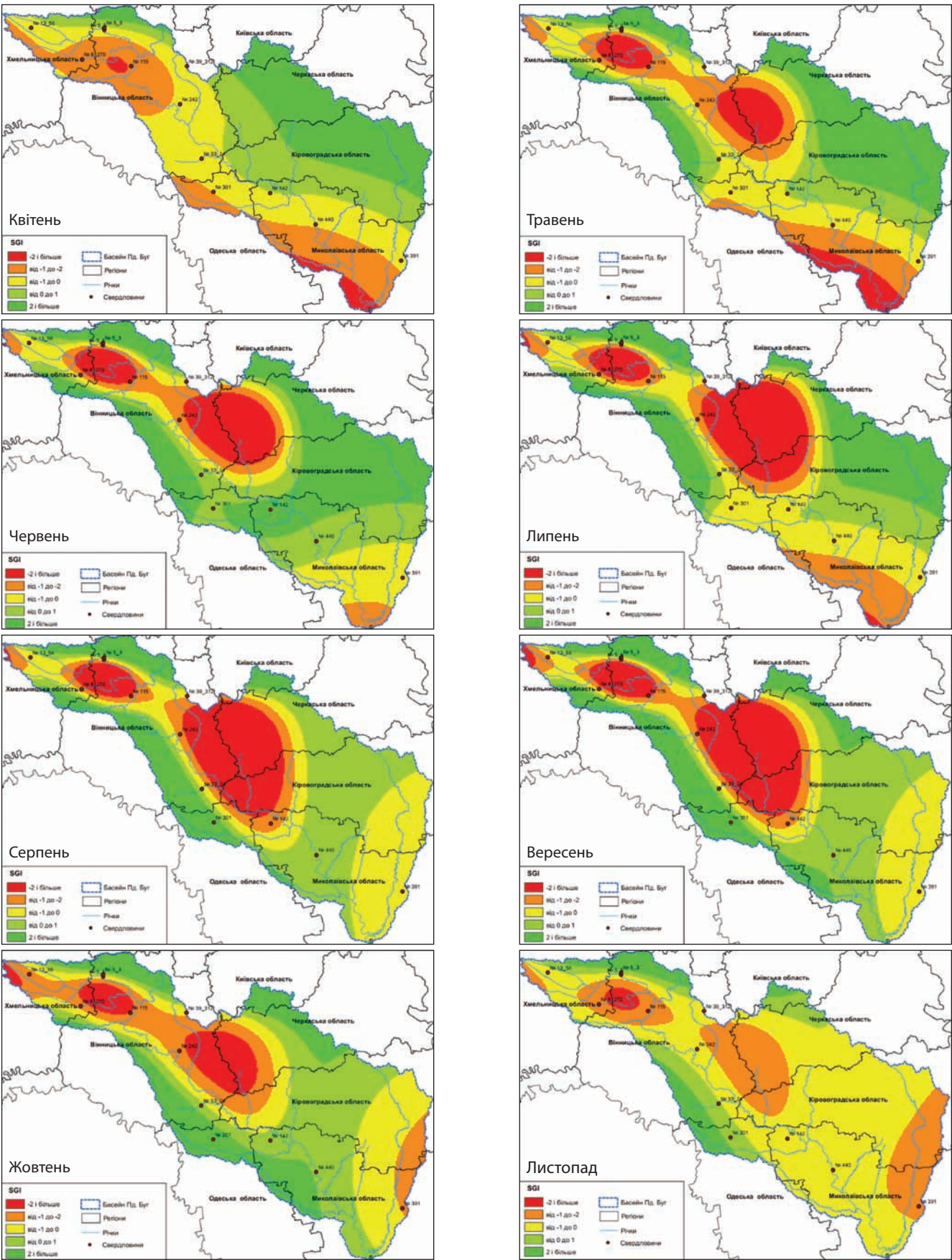


Рис. 11. Карти стандартизованого індексу SGI за безморозні місяці для басейну р. Південний Буг, 2016 рік.

коректних екстраполяцій. Координатна система — WGS 84 / UTM zone 36N (EPSG:32636).

Для оцінки взаємозв'язку між атмосферними опадами та РГВ у басейні р. Південний Буг було проведено просторове картографування стандартного індексу опадів (SPI) та стандартного індексу ґрунтових вод (SGI) за 2016 рік. Просторова інтерполяція обох індексів здійснювалася у середовищі ArcMap методом сплайну.

У 2016 році на картах SPI найбільш інтенсивні від'ємні значення (що свідчать про дефіцит опадів та посушливі умови) спостерігались у липні, серпні та особливо вересні. У ці місяці від'ємні значення охопили більшу частину басейну, зокрема центральні та південні райони. У вересні значна частина території потрапила до класу сильного і навіть надзвичайного дефіциту опадів ($SPI \leq -2$) (див. *рис. 10*).

Водночас карти SGI демонструють поступову реакцію РГВ на посушливі умови або кумулятивний ефект у змінах SGI. Вже із квітня-травня у центральній частині басейну з'являються перші ділянки з від'ємним SGI, меншим за -1 . У червні-липні масштаби негативних значень суттєво зростають, а у серпні та вересні вони охоплюють більшість центральних районів басейну. Найбільш виражена негативна аномалія SGI спостерігається у вересні-жовтні, після чого в листопаді починається поступове відновлення (див. *рис. 11*).

Такий характер зміни SGI вказує на наявність часового лагу (затримки) реакції рівнів ґрунтових вод відносно змін SPI. На основі візуального аналізу встановлено, що затримка реакції становить приблизно 1–2 місяці. Наприклад, максимум від'ємних значень SPI фіксується в липні-вересні, а SGI досягає свого мінімуму у вересні-жовтні.

Це відповідає природі залежності підземного стоку від атмосферних опадів: зменшення кількості опадів спочатку впливає на поверхневу вологість, а лише згодом — на живлення водоносних горизонтів. Така затримка залежить від гідрогеологічних умов, в т.ч. глибини залягання водоносних горизонтів, фільтраційних властивостей ґрунтів і типу живлення.

Результати порівняльного аналізу SPI та SGI у басейні річки Південний Буг у 2016 році підтверджують висновки, зроблені Bloomfield & Marchant (2013) у Великій Британії, зокрема щодо часових лагів та впливу геологічних умов на прояв гідрогеологічної посухи. У нашому випадку мінімальні значення SPI зосереджуються у літні місяці (липень–вересень), тоді як SGI демонструє відкладену реакцію підземних вод із поступовим розширенням зони негативних значень від квітня до вересня, що вказує на часовий лаг у кілька місяців.

У згаданому дослідженні встановлено, що часова затримка SGI від SPI (lag_max) зазвичай становить від 0 до 2 місяців і пов'язана з автокореляцією рівнів підземних вод (m_max), яка у свою чергу залежить від товщини зони аерації, типу водоносного горизонту, гідравлічної провідності.

Таким чином, результати просторового порівняння SPI та SGI підтверджують важливість урахування гідрогеологічних характеристик при оцінці реакції підземних вод на атмосферні аномалії. Як показано у роботі Bloomfield & Marchant (2013), саме поєднання автокореляційних властивостей SGI із значенням РГВ та складом порід дозволяє краще зрозуміти інерційність системи та передбачити тривалість і масштаб гідрогеологічних посух.

Порівняння одночасних або зсунутих на кілька місяців розподілів SPI та SGI (*рис. 10, 11*) переконує, що кліматична зональність або розподіл опадів не мають вирішального впливу на просторовий розподіл SGI по території басейну. Деяке просторове співпадіння SPI та SGI спостерігається лише в жовтні. Гідрогеологічна посуха тяжіє до областей розвантаження підземних вод. Тобто зменшення значень SGI відбувається не в широтному напрямку, підпорядковано зростанню температури та зменшенню суми опадів на південь, а вздовж центральної осі басейну — ближче до головної дрени. Це підтверджує концепцію розвитку гідрогеологічної посухи, сформульовану раніше (Шевченко та ін., 2021; Шевченко та ін., 2021а): спочатку на зменшення кількості опадів реагує річкова мережа, падіння рівнів у якій формує поле зростаючих у часі градієнтів потоку ґрунтових вод із водозбору. Це спонукає до збільшення витрат латерального стоку ґрунтових вод до річки, що за браку достатнього інфільтраційного живлення, створює умови для спрацювання запасів ґрунтових вод і рецесії РГВ. Короткі повноводні періоди поверхневого стоку лише частково відновлюють РГВ на ділянках водосховищ, у середній та нижній частині басейну, оскільки зливовий характер опадів забезпечує переважно саме поверхневий стік, а вплив високих рівнів у річці на РГВ обмежується відстанню в перші десятки метрів.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження виконано кількісну та просторову оцінку метеорологічної і гідрогеологічної посухи в басейні річки Південний Буг на основі аналізу індексів SPI та SGI.

Доведено, що за термінами, характером проявів, підпорядкованістю та власне, наявністю самостійного індексу посухи, доцільно виділяти гідрогеологічну посуху окремо від гідрологічної. Виділяється три типи обумовленості гідрогеологічних посух:

1) метеорологічною посухою (на вододілах та схилах), 2) переважно гідрологічною посухою та опосередковано — метеорологічною (в долинах річок, в т.ч. на низьких терасах); 3) переважно метеорологічною посухою та меншою мірою — гідрологічною (високі тераси, схили). Глибокі рецесії РГВ, які ототожнюються з гідрогеологічними посухами ($SGL < -2$), здебільшого почали проявлятися у даному басейні починаючи із 2007 р.

Результати свідчать про наявність просторової відповідності між проявами дефіциту опадів та зниженням рівнів ґрунтових вод, проте з чітко вираженим часовим лагом. Встановлено, що найбільш інтенсивна метеорологічна посуха у 2016 році спостерігалася у липні-вересні, тоді як мінімальні значення SGI фіксувалися із затримкою на 1–2 місяці. Така інерційність реакції підземних вод підтверджує відому послідовну успадкованість посух — від метеорологічної до гідрологічної і ґрунтової, а згодом — до гідрогеологічної. Інтервал запізнення реакції РГВ залежить від його значень та ступеню гідравлічного зв'язку першого від поверхні водоносного горизонту із напірним горизонтом, що лежить нижче та найближчою річкою.

У подальшому варто зосередитись на виявленні та дослідженні певних сукупних просторових ефектів. Передбачається, що усереднення SPI або абсолютних значень суми опадів по групі точок у верхній частині басейну дасть певний відгук із певним лагом у значеннях SGI в цій самій частині басейну, можливо в середній чи навіть нижній частинах.

Аналіз динаміки SGI за багаторічними рядами (1980–2021) по 9 свердловинах показав значну просторову неоднорідність проявів посух, зокрема найбільш чутливими до метеорологічних збурень виявилися РГВ у центральній частині басейну.

Найважливішим висновком є те, що просторовий розподіл SGI не підпорядковується значною мірою кліматичній зональності та розподілу опадів по території басейну. Деяке просторове співпадіння SPI та SGI спостерігається лише в жовтні. Гідрогеологічна посуха формується у першу чергу в областях розвантаження підземних вод. Зменшення значень SGI відбувається не в широтному напрямку, а вздовж центральної осі басейну — ближче до головного водотоку.

Представлена методика та отримані результати є важливою складовою оцінки вразливості підземних вод до кліматичних змін та основою для розробки заходів щодо їх заощадливого, сталого використання. Отримані результати підтверджують доцільність порівняння SPI і SGI для розуміння формування гідрогеологічної посухи, комплексної оцінки посушливих явищ. Для прогнозування відповіді підземної гідросфери на зміни клімату доцільно провести регресійний та факторний аналізи SGI та абсолютних значень місячної суми опадів (із зміщенням у часі) і рівнів води у найближчих відкритих дренах. Запропонований підхід може бути інтегрований у систему управління водними ресурсами та стратегії адаптації річкових басейнів України до кліматичних викликів.

ЛІТЕРАТУРА

- Афанасьєв, С., Летицька, О., Мудра, К., Ярошевич, О. (2022). Басейнове управління водних ресурсів річки Південний Буг. План управління річковим басейном Південного Бугу (Проект). Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, Державне агентство водних ресурсів України. [PDF-документ].
- Геомапи України. Районування України. Отримано з <https://geomap.land.kiev.ua>
- Шевченко, О., Бублясь, В., Ошурок, Д. (2023). Аналіз геофізичних, метеорологічних та гідрогеологічних даних для пояснення невідповідностей між інфільтрацією та атмосферними опадами. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Геологія)*. **Вип. 1** (100), 111–123. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.13>
- Шевченко, О.Л., Лободзінський, О.В., Наседкін, І.Ю., Чорноморець, Ю.О., Шклярєнко, В.В. (2024). Розчленування гідрографів річок з урахуванням даних гідрогеологічних спостережень. *Геологічний журнал*, **1**(386), 32–46. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.1.288190>
- Шевченко, О.Л., Скорбун, А.Д., Осадчий, В.І., Чарний, Д.В. (2021). Мінливі ритми в режимі ґрунтових вод та їхній зв'язок з кліматичними чинниками. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Геологія)*. **Вип. 2** (93), 71–82. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.93.08>
- Шевченко, О.Л., Скорбун, А.Д. & Чарний, Д.В. (2021а). Підпорядкованість коливань рівнів ґрунтових вод в басейні р. Південний Буг кліматичним змінам. *Вісник Одеського національного університету. Географічні та геологічні науки*, **26**(2(39)), 175–194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202)
- Шевченко, О.Л., Чарний, Д.В., Осадчий, В.І., & Ільченко, А.О. (2021б). Стік ґрунтових вод у басейні річки Південний Буг в умовах глобального потепління. *Геологічний журнал*, (3), 3–16. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237361>
- Український гідрометеорологічний інститут. Land & Water: Агро-гідрологічна модель річкових басейнів України. Лабораторія моделювання річкових систем. <https://landwater.uhmi.org.ua/>
- Український гідрометеорологічний центр. Офіційний сайт Українського гідрометеорологічного центру. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. <https://meteo.gov.ua>
- Bloomfield, J. P., & Marchant, B. P. (2013). Analysis of ground-water drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**(12), 4769–4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>
- GIS State Water Cadaster of Ukraine. (2021). Межі водозбірної басейну Південного Бугу на топографічній карті України

- [Картографічне зображення]. Отримано з <https://geoportal.davr.gov.ua:81>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The standardized precipitation index: A tool for identifying droughts. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, **391**(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Van Lanen, H. A. J., Wanders, N., Tallaksen, L. M., & van Loon, A. F. (2013). Hydrological drought across the world: Impact of climate and physical catchment structure. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**(4), 1715–1732. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1715-2013>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, **23**(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- ## REFERENCES
- Afanasiev, S., Letytska, O., Mudra, K., & Yaroshevych, O. (2022). River Basin Management Plan of the Southern Bug River Basin (Draft). Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, State Water Resources Agency of Ukraine. [PDF document, in Ukrainian].
- Bloomfield, J.P., & Marchant, B.P. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**(12), 4769–4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>
- Geomaps of Ukraine. Zoning of Ukraine. Retrieved from <https://geomap.land.kiev.ua>
- GIS State Water Cadaster of Ukraine. (2021). Boundaries of the Southern Bug River basin on the topographic map of Ukraine [Cartographic image]. Retrieved from <https://geoportal.davr.gov.ua:81>
- McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The standardized precipitation index: A tool for identifying droughts. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*.
- Mishra, A.K., & Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, **391**(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Shevchenko, O., Bublyas, V., & Oshurok, D. (2023). Combination of geophysical and hydrogeological data to explain contradictions between infiltration and atmospheric precipitation. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, **1**(100), 111–123. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.100.13>
- Shevchenko O.L., Lobodzinskiy O.V., Nasedkin I.Yu., Chornomorets Yu.O., Shkliarenko V.V. 2024. Decomposition of river hydrographs taking into account data of hydrogeological observations. *Geologichnij zhurnal*, **1**(386): 32–46. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.1.288190>
- Shevchenko, O., Skorbut, A., Osadchii, V., & Charny, D. (2021). Variable rhythms in groundwater regime and their relationship with climate factors. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, **2**(93), 71–82. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.93.08>
- Shevchenko, O.L., Skorbut, A.D., & Charny, D.V. (2021a). Subordination of fluctuations of groundwater levels in the Southern Bug river basin to climate change. *Visnyk of Odesa National University. Geographical and Geological Sciences*, **26** (2(39)), 175–194. [https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2\(39\).246202](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2021.2(39).246202)
- Shevchenko, O.L., Charny, D.V., Osadchii, V.I., Il'chenko, A.O. (2021b). Groundwater runoff in the Pivdennyi Buh river basin in conditions of global warming. *Geologichnij zhurnal*, **3**(376), 03–16. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237361>
- Van Lanen, H.A.J., Wanders, N., Tallaksen, L. M., & van Loon, A. F. (2013). Hydrological drought across the world: Impact of climate and physical catchment structure. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**(4), 1715–1732. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1715-2013>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, **23**(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Ukrainian Hydrometeorological Center. Official website of the Ukrainian Hydrometeorological Center, State Emergency Service of Ukraine. <https://meteo.gov.ua>
- Ukrainian Hydrometeorological Institute. Land & Water: Agro-hydrological model of river basins of Ukraine. Laboratory of River Systems Modeling. <https://landwater.uhmi.org.ua/>

Valentyn Shklyarenko

ORCID: 0009-0002-9866-558X

vlkshkl@ukr.net

Oleksii Shevchenko

ORCID: 0000-0002-5791-5354

shevch62@gmail.com

Oleksandr Shcheglov

Aleshcheglov@gmail.com

Ukrainian Hydrometeorological Institute
of State Emergency Service of Ukraine and
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

RECOGNITION OF HYDROGEOLOGICAL DROUGHTS BY SPI AND SGI INDICES IN THE SOUTHERN BUG RIVER BASIN

It is obvious that hydrogeological drought is caused by meteorological drought and is caused by a decrease in groundwater recharge and an increase in its flow. However, it remains unclear which factor is more influential: rising air temperatures, decreased precipitation, declining river stages, or other related variables. The article highlights a method for identifying hydrogeological drought based on the analysis of SGI indices and confirmation of meteorological drought. Based on retrospective data, the duration of meteorological droughts was assessed to determine whether it was sufficient to trigger significant and prolonged recession in groundwater levels. Groundwater level depths affected by meteorological drought were also analyzed. Spatial and temporal patterns of drought manifestation were identified, along with the degree of inertia in groundwater level response to climatic changes and meteorological phenomena. The analysis was conducted using data from hydrogeological monitoring wells in the Southern Bug River Basin, by calculating and comparing the Standardized Precipitation Index (SPI)

and the Standardized Groundwater Index (SGI). A series of SPI and SGI maps for the year 2016 was developed using the spline interpolation method in the ArcMap environment. Additionally, the long-term dynamics of SGI over the 1980–2020 period were analyzed using data from nine monitoring wells. The results showed spatial correlation between the indices, but with a temporal lag: the most intense meteorological drought was recorded in July–September, while the greatest groundwater level decline was observed in August–October. The analysis allowed the identification of the most drought-prone regions in the central part of the basin and substantiated the feasibility

of combining SPI and SGI indices for comprehensive water resource monitoring. The proposed approach can serve as a foundation for the development of a regional early warning system for groundwater droughts and adaptive groundwater management under climate change conditions.

Keywords: Groundwater drought, Standardized indices, SPI, SGI, Climatic impacts, Southern Bug River Basin, Drought monitoring, Temporal lag, Interpolation, Groundwater level, meteorological drought, factors.

