

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 556.332:62:556.324

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.13>О. Шевченко¹, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: shevch62@gmail.com;

В. Бублясь², канд. геол.-мінералог. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: bublias@ukr.net;

Д. Ошурок¹, канд. геогр. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: oshurok.dm@gmail.com;

¹Український гідрометеорологічний інститут НАН України та ДСНС України,
просп. Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна;²Інститут геологічних наук НАН України, вул. О. Гончара, 55^б, м. Київ, Україна**АНАЛІЗ ГЕОФІЗИЧНИХ, МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ДАНИХ
ДЛЯ ПОЯСНЕННЯ НЕВІДПОВІДНОСТЕЙ
МІЖ ІНФІЛЬТРАЦІЄЮ ТА АТМОСФЕРНИМИ ОПАДАМИ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меншовим)*

Розглянуто традиційний та нестандартний підходи до аналізу розрахункових значень інфільтраційного живлення ґрунтових вод із використанням показника заряду електричного поля приземної атмосфери. Зіставлення результатів гідрогеологічних розрахунків та спостережень за специфічними електрофізичними і метеорологічними чинниками дозволило пояснити невідповідності між значеннями інфільтраційного живлення та кількості опадів.

Визначено щодобові значення живлення ґрунтових вод за даними 41-річних спостережень по свердловинах в м. Хмельник. Середнє багаторічне значення інфільтраційного живлення ґрунтових вод з РГВ 0,8–2,3 м становило 145 мм, з РГВ 2,7–4,5 м – 14,7 мм (коливання в діапазоні від 129 мм до від'ємних значень). Крім початкового періоду впливу змін клімату на режим ґрунтових вод (1980–1988 рр.), кореляція між річними значеннями інфільтрації та опадів невисока. Значуща кореляція існувала лише до 1997 року для опадів літнього та осіннього сезонів. На цьому ж етапі (1980–1997 рр.) також зафіксовано тісний зв'язок між температурою та інфільтрацією зимового періоду. Проте існують також і значні суперечності у співвідношеннях інфільтрації та опадів, які вдалось пояснити лише із залученням даних власних електрофізичних спостережень. У період з 2008 по 2017 р. від'ємні значення коефіцієнтів кореляції "інфільтрація-температура" за літній сезон змінились на позитивні, що наводило на думку про зростання вагомості механізмів перенесення вологи у вигляді пари. Підкріплюють цей висновок дані про знак заряду статичного електричного поля приземного шару атмосфери. За високих значень напруженості статичного електричного поля (E) із від'ємним знаком, напрямку руху вологи має висхідний характер, завдяки чому випаровування із зони аерації збільшується у декілька разів порівняно з тим, що буває за нейтральних значень E. А напруженість електричного поля із додатним знаком формує низхідний рух вологи, який призводить до підвищення РГВ. Звідси, більш зрозумілими стають випадки, коли за значної кількості опадів отримано низькі значення інфільтраційного живлення (2006, 2008 р.). І навпаки, низька кількість опадів за 2014–2017 рр. (середнє значення 524 мм) супроводжувалась підвищенням живленням ґрунтових вод (10 % вище від норми), стабільним підземним стоком до річки в межах 90–100 м³/рік/м та зростанням РГВ завдяки додатним значенням статичного електричного поля. Цей електричний чинник має настільки потужний вплив, що здатний нейтралізувати та ефективно протидіяти негативному впливу на живлення ґрунтових вод зростання температури і дефіциту вологості повітря. Крім того, зростання випаровування стримувалось постійним зменшенням швидкості вітру.

Оскільки електродинамічні процеси мають значну, а подекуди й визначальну роль не лише у вологоперенесенні в зоні аерації, а й у регіональних процесах живлення ґрунтових вод, створення штучних позитивно заряджених статичних полів над поверхнею ґрунту може стати найбільш ефективним запобіжником виснаження запасів ґрунтових вод під час гідрогеологічної посухи.

Ключові слова: інфільтрація, рівні ґрунтових вод, заряд статичного електричного поля, температура повітря, опади, дефіцит вологості повітря, баланс, зона аерації, електродинаміка.

Вступ. У сучасних реаліях непередбачуваності погодних явищ та посилення несприятливих довготривалих кліматичних змін актуальним є пошук ефективних моделей прогнозування гідрогеологічних посух, а також репрезентативних гідрогеологічних показників і відносно незалежних гідрометеорологічних, гідрофізичних та геофізичних параметрів для цих моделей. Якщо ключовим показником впливу змін клімату на річковий стік є витрати відкритих потоків (Carvalho, Wang, 2019; Modarres, 2007; Tabari et al., 2013), то гідрогеологічна посуха добре проявляється за аномальними зниженнями рівня ґрунтових вод (РГВ) і розрахунковими значеннями їх балансу. РГВ є універсальним інтегральним параметром, з використанням якого виконуються всі чисельні розрахунки змінних показників водообміну, в т. ч. інфільтраційного живлення – прибуткової складової балансу, тісно пов'язаної із кліматом і мінливими погодними умовами.

Ґрунтові води вочевидь є одним із багатьох взаємодіючих природних компонентів складної динамічної системи, що зазнають новітніх змін, які, скоріш за все, в історії режимних спостережень ще не відбувались. Аномальні зниження РГВ, які спостерігались в Україні в

2011–2020 рр. майже повсюдно (Стан..., 2020; Шевченко та ін., 2021), і до сьогодні подекуди не набули помітного зворотного характеру, свідчать про зменшення емісних запасів перших від поверхні водоносних горизонтів, що є ознакою від'ємного водного балансу (Шевченко, Осадчий, 2020). Сучасні зміни в режимі рівня та стоку ґрунтових вод передусім пов'язані із змінами температури, кількості та характеру випадіння атмосферних опадів, режиму стоку річок (Шевченко і др., 2019; Шевченко та ін., 2021а). Проте коефіцієнти детермінації отриманих рівнянь регресії невисокі ($\leq 0,54$), а якість прогнозування лише на основі змін кількості опадів та середньої температури не достатня, що наводить на думку про існування більшої кількості, а можливо й більш впливових, чинників, ніж використовується зазвичай.

Вже достатньо давно доведено, що перенесення вологи у ненасиченій зоні відбувається, крім гравітаційних сил і градієнта вологості, під дією градієнта температури та градієнта електричного потенціалу (Kuzmak, Sereda, 1957; Тэйлор, Кері, 1966 та ін.). Досить істотним також є вплив на евапотранспірацію та живлення ґрунтових вод видового складу та віку рослинного покриву (Brechtel,

© Шевченко О., Бублясь В., Ошурок Д., 2023

1976; Гриневский, 2012). Більшість із цих чинників неусталені та слабо передбачувані, а їх накладена дія може зумовлювати й певні аномалії в характері живлення ґрунтових вод, які не дозволяють розглядати вологоперенесення як строго детермінований процес, зумовлений лише всмоктуючим тиском або ступенем насичення ґрунту вологою. Врахування таких різномірних механізмів та чинників переміщення вологи, як то глобальні зміни температури, регіональні зміни кількості опадів, швидкості вітру, локальні і точкові зміни напруженості електричного поля, проникності зони аерації (ЗА) та ін., значно ускладнює моделювання та прогнозування процесу водообміну, проте дає загальне розуміння об'єктивних причин перенесення вологи та коливань РГВ.

Сучасні методи прогнозування кліматичних змін здебільшого ґрунтуються на процедурі застосування ймовірнісних моделей, в які послідовно закладаються можливі комбінації метеорологічних параметрів. Це дозволяє отримати ряд сценаріїв, один з яких виявиться найбільш наближеним до реального. Для отримання прогнозу змін клімату використовують підхід "псевдоглобального потепління", який передбачає створення сигналу збуреної зміни клімату (Chen et al., 2020), що провокує відповідні відгуки метеорологічних та гідрологічних показників. Цей сигнал включає температуру поверхні землі, висоту геопотенціалу, вологість, горизонтальний вітер, температуру поверхні моря, тиск на рівні моря та температуру ґрунту (Liu et al., 2017; Rasmussen et al., 2017). Очевидно, що прогнозуючи живлення ґрунтових вод та РГВ, які залежать від змін клімату, слід враховувати регіональні кліматичні та локальні гідрофізичні показники в ЗА. Однак і цього недостатньо, коли постає завдання завчасного виявлення небезпечних процесів, на кшталт гідрологічної посухи, що ведуть до регіональних змін водних ресурсів.

Проблемні питання. За існуючими методичними схемами оцінка живлення ґрунтових вод проводиться за розрахунками інфільтрації атмосферних опадів, бокового притоку та відтоку, а також, у разі потреби, притоку та відтоку із напірного горизонту, що лежить нижче – під слабопроникною підшоєю. Проте виділити окремі елементи живлення та розвантаження, або визначити усі прибутково-витратні складові і виконати балансову оцінку живлення/розвантаження підземних вод доволі складно. В Україні складнощі з оцінкою вертикального перетікання здебільшого пов'язані з відсутністю кушових свердловин, а розвантаження ґрунтових вод до річки – з відсутністю гідрогеологічних створів, що замикаються на гідрометричних постах у зоні розвантаження ґрунтових вод. А тому часто користуються спрощеною схемою, за якою інтегральну величину живлення (або розвантаження) ґрунтових вод отримують за результатами вивчення характеру коливання РГВ, хоча для виконання прогнозової оцінки одних даних характеру зміни РГВ недостатньо. Без додаткової звірки або коригування іншими методами оцінка інфільтрації у моделях водного балансу може призвести до помилки на цілий порядок (Gee, Hillel, 1988). Метод прив'язки оціночного поповнення ґрунтових вод до фіксованої частки річних опадів також є далеко не точним, оскільки він не відображає сезонних коливань, ролі біоти та факторів, що контролюють рух вологи у верхніх шарах ЗА. Як показує практика, навіть детальний моніторинг опадів, транспіраційної вологи і врахування гідрофізичних властивостей порід не приносить бажаних результатів. Більш якісна оцінка кількісних показників живлення ґрунтових вод потребує нових підходів і залучення чинників, які нині стоять поза увагою гідрогеології та гідрофізики.

Навіть за наявності на сьогодні великої кількості теоретичних розробок, методологічних підходів та результатів польових і лабораторних досліджень (Bear, 1979; Healy, Cook, 2002; Ситников и др., 2003; Maxwell, 2010; Гриневский, 2012; Carrera-Hernández et al., 2012) складно переконливо пояснити низку явищ, пов'язаних із рухом вологи в ЗА і виконати достовірний прогноз природних ресурсів ґрунтових вод.

Для поліпшення достовірності гідрогеологічних та гідрологічних оцінок і прогнозів доцільно враховувати одночасно виміряні метеорологічні, гідрологічні, гідрофізичні та гідрогеологічні показники. Отже, щоб передбачити гідрогеологічну посуху або підтоплення необхідно поєднувати дані спостережень на комплексних метеогідрогеофізичних балансових майданчиках з регіональними характеристиками змін клімату та поверхневого стоку, визначеними за даними кількох метеостанцій і постів, а також з даними про глобальні циркуляційні процеси в атмосфері та прилеглих до материка океанах.

Метою даної роботи є виявлення та пояснення нових чинників, що мають істотний вплив на рух вологи в ЗА, встановлення природи (генетичних ознак) добових, сезонних і багаторічних змін РГВ та інфільтраційного живлення ґрунтових вод на підставі порівняльного аналізу їх із коливаннями не лише загально прийнятих показників (температури, кількості атмосферних опадів, властивостей ґрунтів тощо), а й варіабельності таких чинників, як статичні електричні поля приземної атмосфери, що мають здатність переміщувати порові розчини (залежно від знаку зарядів) у висхідному і низхідному напрямках, а також пружних хвиль (автоколивань покривних відкладів), що виконують роль сепаратора рідкої і твердої фаз порід.

Об'єкти досліджень. Головним критерієм вибору об'єктів для підтвердження даної концепції та впровадження нетрадиційних підходів інтерпретації результатів режимних спостережень і гідродинамічних розрахунків були вимоги до специфічних геологічних умов – наявність на невеликій площі ділянок із добре сформованою мікроструктурою, де проявляються різкі зміни мікрогеодинамічних процесів. Наступною вимогою були необхідні технічні можливості отримання даних тривалих безперервних спостережень за режимом ґрунтових та поверхневих вод, а також комплексу геофізичних показників атмосфери і літосфери. За цими критеріями були підібрані два полігони розміщені у різних геологічних умовах. Перший полігон розташований у верхів'ях басейну р. Південний Буг, що лежить у північно-західній частині країни та належить лісостеповій зоні із достатнім рівнем зволоження. Він забезпечений гідрогеологічними свердловинами державної моніторингової мережі, гідрологічним постом та метеостанцією в м. Хмільник Вінницької області. А широкий спектр даних щодо закономірностей руху вологи в ЗА і живлення підземних вод отримано завдяки регулярним спостереженням і експериментальним роботам на полігоні "Лютіж", розташованому на вододілі між річкою Ірпінь і Київським морем у зоні південного Полісся. Специфіка дослідницьких робіт на цьому полігоні полягає у вивченні ролі мікрогеодинамічних і електродинамічних процесів у вологоперенесенні та фільтрації.

Методичні аспекти дослідження. По кількох балансових ділянках у верхній частині водозбору річки Південний Буг з різними РГВ та умовами їх живлення і розвантаження розраховано величини живлення ґрунтових вод для багаторічного періоду, який представляє кліматичний етап підвищення середньорічних температур і деякого зменшення суми атмосферних опадів (1980–

2020 рр.). Нові чинники, які мають істотний вплив на живлення ґрунтових вод, вивчалися на полігоні "Лютіж". В останньому випадку моніторингові дослідження були виконані за двома напрямками: 1) оцінка проявів і факторів мікрогеодинамічних процесів за допомогою синхронного контролю основних неусталених показників у межах мікрогеодинамічної зони (МГЗ) і фонові ділянки; 2) вивчення особливостей вертикального і горизонтального переміщення рідкої, твердої і газоподібної складових МГЗ. Проаналізовано розподіл живлення по сезонах року та по етапах, що виділяються за характером змін метеорологічних, геофізичних і гідрофізичних показників.

Поведінка води в породах зони аерації підпорядковується дуже складним природним і техногенним процесам ймовірного характеру, і може бути описана в термінах різних методичних підходів: 1) водно-балансового – за зміною запасів вологи, що отримують з різниці прибуткових і витратних складових, для чого існують сучасні балансові моделі (*Dubois et al., 2021*); 2) гідродинамічного – за коливаннями напору (РГВ) та розв'язанням скінчено-різницевого рівняння (що відносить цей метод також до балансових) (*Вольфцун, 1972; Киселев, 1967*) або за швидкістю і в'язкістю водних потоків (*Жернов, 1982; Лукнер та Шестаков, 1986; Bush et al., 1993*); 3) термодинамічного – за коливаннями тисків порової вологи в породах ЗА (*Bear, 1979; Ситников, 2010; Шевченко та ін., 2016*). Можливе також поєднання (комплексування) двох або більше підходів. Ми ж пропонуємо об'єднати для визначення та аналізу (у т.ч. верифікації) інфільтраційного живлення гідродинамічний метод аналізу даних спостережень за коливаннями РГВ та статистичний метод, який описує фактичну (емпіричну) залежність величини поповнення ґрунтових вод від метеорологічних та геофізичних чинників.

Для оцінки інфільтраційного живлення ми скористались відомим гідродинамічним методом розрахунків за різницею крайніх значень (*Киселев, 1967; Шевченко та Наседкин, 2001; Qurtas, 2018*). Основним є балансове рівняння, яке включає складову, що описує різницю між бічним відтоком і припливом до балансової ділянки за одиницю часу. Величина поповнення ґрунтових вод за рахунок інфільтрації (w) або витрата на випаровування (e) з РГВ (якщо значення від'ємне) визначалась за рівнянням

$$\Delta w = A \pm \Delta Q, \quad (1)$$

де A – зміна запасів ґрунтових вод (мм), яка визначається з рівняння

$$A = \Delta H \cdot \mu \cdot 10^3; \quad (2)$$

ΔQ – різниця між бічним припливом і відтоком на верхній і нижній за потоком границях балансової ділянки за час Δt для двох пунктів спостережень, мм. Оскільки коливання води у річці пов'язані із коливаннями РГВ на заплавах, то для свердловини № 5–3, яка розташована на відстані 86 м від р. Південний Буг у м. Хмільник, було прийнято виділити балансову ділянку в межах половини відстані від річки до свердловини і в гору – до половини відстані до вододілу, виділеного за абсолютними відмітками поверхні землі.

Різницю між бічним припливом та відтоком з балансової ділянки було визначено за чисельним гідродинамічним рівнянням неусталеної фільтрації (*Шевченко та Наседкин, 2001*):

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

де 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 рівні ґрунтових вод у пунктах спостережень, м; l – відстань між пунктами спостережень, м; L – відстань від верхньої за потоком свердловини до лінії підземного вододілу, м; 10^3 – коефіцієнт переходу в мм шару води.

Слід також наголосити, що процес живлення ґрунтових вод і їх відтоку до річки, судячи з коливань РГВ та рівня води в річці, для прирічкових, приозерних та нижніх частин транзитних ділянок є різко неусталеним і тому застосування аналітичних рівнянь усталеної фільтрації для визначення витрат потоку та розрахунків балансу є некоректним, а їх результати – помилковими. На вододілах, де амплітуда річних коливань РГВ менша за 1,0 м, для орієнтовних оцінок допускається застосування спрощених рівнянь усталеної фільтрації (на основі рівнянь Дарсі), хоча режим вологи в зоні аерації завжди залишається неусталеним.

Проте, як побачимо далі, скінчено-різницево рівняння, що використовують дані фактичних вимірювань РГВ, мають істотні недоліки: по-перше, за відсутності кущових свердловин не дають можливості виділити складову напірного живлення/розвантаження, по-друге – не дають змоги розділити інфільтраційне та конденсаційне живлення ґрунтових вод.

Для пояснення коливань інфільтраційного живлення в часі та виявлення чинників цих коливань були розроблені спеціальні прилади вимірювання коливань напружено-деформаційного стану порід і статичних електричних полів приземної атмосфери в автоматичному режимі, а також проведені експериментальні дослідні роботи зі встановлення закономірностей руху порових розчинів у породах зони аерації за допомогою гідрогеофізичної 8-канальної станції на методичному полігоні "Лютіж". Загальну оцінку руху вологи виконано за морфологічними особливостями графіків зміни РГВ. За цими показниками встановлено періоди і величину активного живлення водоносного горизонту та його розвантаження, а також розраховано об'єми води, що надходили до водоносного горизонту за певний період.

Результати досліджень. Під час багаторічних режимних спостережень за коливаннями РГВ і вологістю порід помічено, що волога з різною інтенсивністю постійно рухається як у низхідному, так і у висхідному напрямках протягом усього року, часто порушуючи традиційні причинно-наслідкові зв'язки між кількістю вологи, що надійшла на поверхню ґрунту, та реакцією на неї РГВ (*Бублясь, 2006; Шевченко та ін., 2016*). Найінтенсивніші коливання РГВ спостерігаються в осінню і весняну пори року – в періоди низьких і помірних опадів, проте високої нестабільності атмосфери, статичних електричних і баричних полів, а також значних коливань величин напружено-деформаційного стану порід.

Використовуючи дані багаторічних спостережень за РГВ, гідрометеорологічними показниками і геофізичними явищами, що впливають на рух вологи в породах зони аерації, спробуємо встановити між ними певні генетичні зв'язки або залежності. Для цього проведемо порівняльний аналіз даних гідрогеологічних, гідрофізичних і геофізичних спостережень та балансових розрахунків по двох полігонах: перший – у верхній частині басейну р. Південний Буг, другий – на правобережжі Київського водосховища.

За основу порівняльного аналізу взято дані безперервних спостережень за РГВ за відносно великий часовий проміжок (1980–2020 рр.), який охоплює період до початку активної фази потепління (1989 р.), активну фазу підвищення температури та період гідрологічної (2011–2020 рр.) і гідрогеологічної (2015–2020 рр.) посухи, що

являє надзвичайно важливу інформацію для порівняльних оцінок підземного стоку та балансу ґрунтових вод на час змін клімату та гідрогеологічного режиму. Для кращого порівняння та відстеження закономірностей у динаміці змін показників режиму та балансу ґрунтових вод ми виділили окремі, рівноцінні за часом етапи: 1980–1988, 1989–1997, 1998–2007, 2008–2017 та останні три роки (2018–2020). Ці етапи здебільшого маркуються помітними метеорологічними подіями, що вплинули на режим ґрунтових вод (Шевченко та ін., 2021а). За отриманими щодобовими значеннями інфільтраційного живлення коливання його річної суми на ділянці з діапазоном багаторічних значень РГВ у межах 0,8–2,3 м виявились досить значними: від 39,8 мм за 2020 р. до 347,5 мм за 1987 р. Стандартне відхилення річних значень за 41 рік склало 70,79; медіана 139,3; експес 0,767. Інший діапазон значень обсягів живлення отримано для балансової ділянки з коливаннями РГВ у межах 2,7–4,5 м: від -85,3 (1982 р.) до 129,0 мм (2013 р.). Отже інфільтрація, як у короткі терміни, так і у багаторічному плані, має достатньо неусталений характер і представляти її у вигляді

ізоляції по одиничних визначеннях або навіть усередненнях за 3–4 роки непоказово і некоректно.

Оскільки, згідно з традиційними уявленнями інфільтраційне живлення апіорі напряду залежить від кількості опадів, було виконано спочатку парний, а потім і множинний кореляційний аналізи із залученням цього чинника та РГВ як предиктора.

Коефіцієнти парної кореляції (r) між коефіцієнтами інфільтрації та РГВ в абсолютних відмітках достатньо очікувано є не надто високими, хоча і поступово зростають з часом по виділених етапах від 0,58 (1980–1988 рр.) до 0,82 (2008–2020 рр.). Більш доцільно та коректно шукати зв'язок між *потужністю зони аерації* та інфільтраційним живленням. За отриманими r він достатньо значущий: від -0,73 на першому етапі до -0,86 для проміжку 2008–2020 рр.

Вплив річної кількості та сезонного розподілу *опадів* на інфільтрацію також не викликає сумніву. Як бачимо з рис. 1,а, опади відігравали головну роль у живленні ґрунтових вод на обох ділянках з різними РГВ на час перших двох етапів.

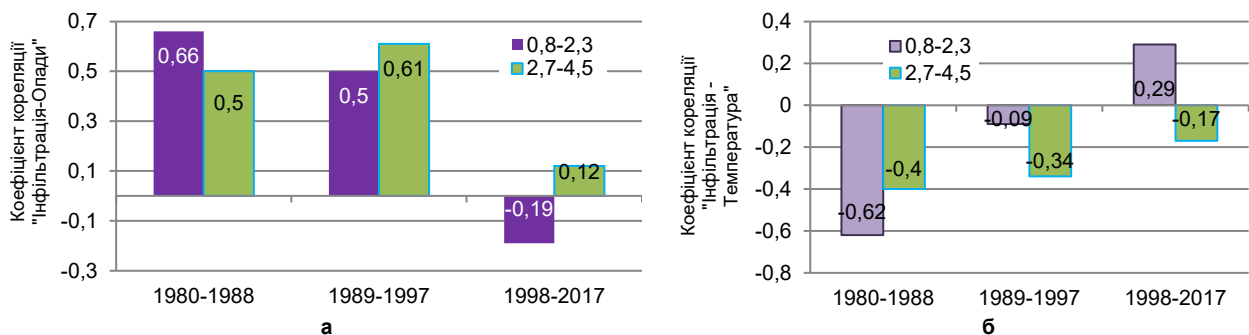


Рис. 1. Поетапні зміни коефіцієнтів парної кореляції між інфільтраційним живленням ґрунтових вод за рік (мм) на ділянках з РГВ, які за багаторіччя коливаються в межах 0,8–2,3 м та 2,7–4,5 м, та: а – сумою атмосферних опадів (мм); б – середньорічною температурою повітря, °С

У 1998–2017 рр., очевидно внаслідок переважання витратних складових балансу над прибутковими (зміна запасу становила 76,9 мм), що пов'язано із характером випаровування, особливостями руху вологи в зоні аерації (ЗА) і відтоку ґрунтових вод, значущий синхронний зв'язок—1999 рр. знизилась до 7,0–11,6. Середній коефіцієнт інфільтраційного живлення на ділянці з РГВ 0,8–2,3 м у період 1980–1988 рр. сягав 35 %, у 1989–1997 рр. – 24,4 %, а у 2018–2020 рр. – 14 %, тобто зменшився у 2,5 раза порівняно з початковим періодом змін клімату на даній території. За абсолютними значеннями інфільтрації зміни ще більш різні, відповідно: 237; 157 і 73 мм. Дані показники однозначно свідчать про певний зв'язок інфільтраційного живлення із зміною кліматичних умов – кількості атмосферних опадів, вологості і температури повітря, сили вітру тощо.

По коефіцієнтах кореляції добре видно (рис. 1), що до початку найбільш помітних кліматичних змін в Україні та Лісостеповій зоні зокрема (1989 р.) інфільтраційне живлення більше залежало від *опадів* як для глибин 0,8–2,3 м, так і для 2,7–4,5 м. Відтоді ж як середня температура лютого перший раз перейшла до позитивних значень (1989 р.) і піднялись літні температури, режим живлення до глибини 2,5 м порушився і рівень зв'язку інфільтраційного живлення з кількістю опадів зменшився до 0,5 (рис. 1,а); а коли середня температура піднялась до значень 8,1 °С (1998–2007 рр.), тобто на 1,3 °С порівняно з етапом 1980–1988 рр., відчутно зменшилось інфільтраційне живлення ґрунтових вод на глибинах 0,8–2,3 м (рис. 2), вірогідно внаслідок зростання витрат на

випаровування. Зворотні кореляційні залежності *температури* повітря і *живлення* ґрунтових вод (рис. 1,б) показують, що із збільшенням середньорічних температур живлення ґрунтових вод переважно зменшується (Osadchyi et al., 2021), особливо у літній період (рис. 3,б), що цілком зрозуміло. У той же час є очевидна логіка і у збільшенні інфільтраційного живлення при підвищенні температури у зимовий період внаслідок зменшення або відсутності промерзлого шару ґрунту. Відповідно, зменшення з роками значущості зворотної залежності (рис. 1,б) свідчить або про домінування з часом *ефекту зимових відлиг*, або ж про домінування раніше малозначущих механізмів вологоперенесення в зоні аерації влітку, коли випадає найбільше опадів.

На підтвердження першого свідчить помітне *зростання інфільтраційного живлення зимою* 2015–2017 рр. (рис. 3,а), яке контрастує із зменшенням кількості опадів. Талі води зимових відлиг почали відігравати значну роль у живленні вірогідно ще з 1981 р., проте спочатку лише для РГВ до 2,5 м: найтісніший зв'язок інфільтрації та температури *зимового сезону* проявився за період 1981–1988 рр., коефіцієнт кореляції (r) склав 0,71. На період 1989–1997 рр. для РГВ 0,8–2,3 м $r = 0,6$ (надалі був незначущим), а для РГВ 2,7–4,5 м $r = 0,66$. За період 1998–2017 рр. кореляційний зв'язок між інфільтрацією та зимовою температурою не встановлено для жодної з ділянок. У 2015–2017 рр. навіть для більш глибоких ґрунтових вод зменшення кількості опадів виявилось менш впливовим чинником інфільтрації, ніж зростання середньої зимової температури (рис. 3,а).

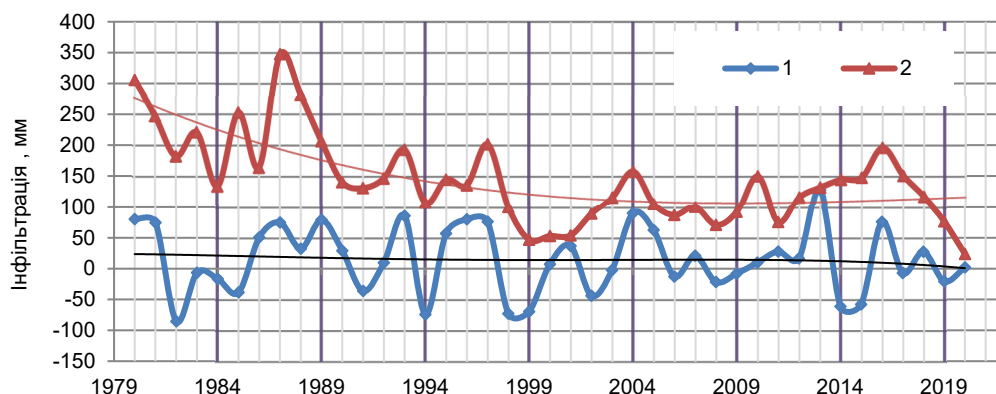


Рис. 2. Динаміка значень живлення ґрунтових вод на глибинах: 1 – 2,7–4,5 м; 2 – 0,8–2,3 м, розрахованих за даними моніторингових спостережень по свердловинах, відповідно, № 5-5 і 5-3 у м. Хмельник

Позитивний ефект впливу на живлення ґрунтових вод підвищеної літньої температури може бути пов'язаний із зростанням ролі *конденсаційної води*. Він тим більший, чим більший перепад денної та нічної температури (різке зростання спостерігається починаючи з 2001–2003 рр.). Конденсаційні процеси найбільше залежать від охолодження поверхні землі вночі. Для останніх десятиріч як раз характерне зростання надходження сонячної радіації у світлу пору та відповідно до закону Стефана–Больцмана – зростання віддачі тепла

вночі, що зумовлює збільшення випадків досягнення точки роси о цій порі. Підкріплюють це позитивні значення γ між інфільтраційним живленням та температурою на етапі 1998–2017 рр. (рис. 1,б).

Отже, позитивне значення γ між інфільтрацією та температурою повітря за 1998–2017 рр. для РГВ 0,8–2,3 м (рис. 1,б) та достатньо високі значення інфільтрації за зиму й літо (рис. 3) свідчать не лише про вирішальну роль зимових відлиг у живленні ґрунтових вод, а й про переміщення вологи на РГВ у вигляді пари.

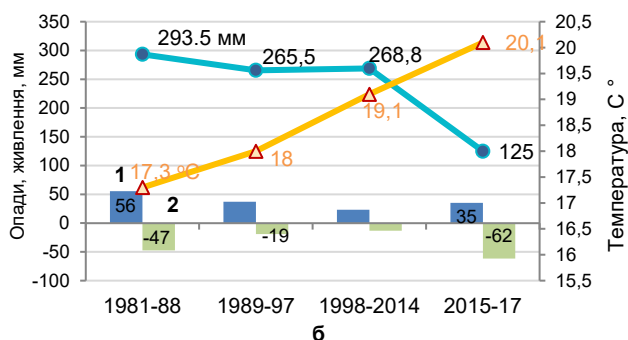
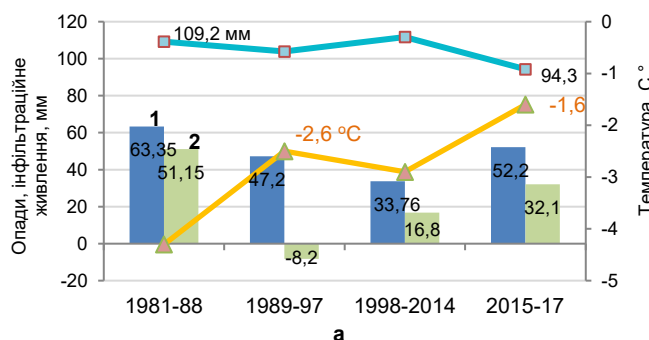


Рис. 3. Розподіл середніх значень інфільтраційного живлення ґрунтових вод по виділених етапах у зіставленні із середньосезонною температурою та середньою сумою атмосферних опадів: 1 – на балансовій ділянці з РГВ 0,8–2,3 м; 2 – на ділянці з РГВ 2,7–4,5 м; а – в зимовий період; б – влітку

До початку глобального потепління роль температури у випаровуванні із зони аерації не була значущою (Ткаченко, 1965). Дані моніторингу вологості порід за останні 15 років на полігоні "Лютіж" також не дають підстав вважати, що величина випаровування вологи із зони аерації є значною. Як відомо із закону Бойля–Маріотта та фактичних гідрометеорологічних даних, з поверхні слабо зволоженого ґрунту за збільшення температури на 1° випаровування зростає на 20–30 мм. Проте у випадку балансової ділянки з РГВ 0,8–2,3 м у м. Хмельник середні значення інфільтраційного живлення по етапах зменшилися з 237,6 мм (1980–1988) до 91,2 мм (1998–2007 рр.) при зростанні середньої температури лише на $1,3^{\circ}\text{C}$. Очевидно, що таке істотне зниження живлення не можна віднести лише на рахунок випаровування.

З викладеного аналізу можна зробити висновки: 1) використання методу парної кореляції без вивчення механізмів руху вологи є недостатнім; 2) прогностичні оцінки живлення ґрунтових вод, побудовані лише на традиційних уявленнях про чинники (опадів, градієнт вологості) та механізми переміщення рідкої вологи переважно під впливом гравітаційних сил можуть виявитись

помилковими. Очевидно, що низька якість оцінки інфільтраційного живлення за кількістю опадів може бути пов'язана не лише із змінами кліматичних умов упродовж холодного та теплого сезонів року, а й із іншими впливовими чинниками, які здебільшого не враховуються на рівні спостережень, розрахунків і прогнозування. На сьогодні є гостра потреба виявлення і вивчення генетичних основ гідрофізичної сутності цих чинників і залучення нових показників у практику.

Певні методичні і теоретичні напрацювання в цьому напрямку, виконані на полігоні "Лютіж", було застосовано для пояснення виявлених особливостей інфільтраційного живлення ґрунтових вод на балансових ділянках у м. Хмельник. На підставі статистичної обробки даних температури, підземного стоку, інфільтраційного живлення, коефіцієнта інфільтрації побудовано зведену таблицю (табл. 1). Аналізуючи наведені показники, можна виділити дев'ять періодів, які відрізняються за важко пояснюваною комбінацією залежних функцій (підземний стік, інфільтрація) та відносно незалежних чинників (опадів, температура), що мали б більш однозначно на них впливати (рис. 4).

Таблиця 1

Метеорологічні показники та розрахункові значення складових балансу ґрунтових вод на прирічковій ділянці з перетіканням напірних вод до ґрунтових (РГВ коливаються в межах 1,0–2,3 м)

Роки	Опади, мм	Підземний стік Q, м³/рік/м	Інфільтраційне живлення, мм	Коефіцієнт інфільтрації	Середньорічна температура, °С	РГВ, м абс. БС	Знак заряду статичного електричного поля
1980	803,0	128,38	305,7	38,07	5,7	246,46	Можливо додатний
1981	801,7	132,23	247,3	30,85	7,4	246,39	
1982	609,2	112,85	182,7	29,99	7,7	246,07	
1983	613,4	109,63	221,4	36,09	8,4	245,98	Вірогідно нейтральний
1984	623,0	89,56	134,6	21,60	7,0	245,72	
1985	700,4	98,60	253,0	36,12	5,7	245,85	
1986	542,6	86,01	164,7	30,35	7,0	245,62	
1987	694,8	132,63	347,5	50,01	5,4	246,29	Можливо додатний
1988	676,9	160,11	281,4	41,57	7,0	246,73	
1989	694,1	131,88	207,2	29,85	8,7	246,25	
1990	542,0	82,10	141,6	26,13	8,8	245,44	Вірогідно нейтральний
1991	729,6	80,87	131,9	18,08	7,3	245,50	
1992	505,9	74,27	147,4	29,13	7,9	245,48	
1993	691,9	91,46	193,6	27,97	7,0	245,60	
1994	487,0	73,25	107,8	22,13	8,4	245,45	
1995	675,5	71,08	145,5	21,55	7,7	245,40	Ймовірно від'ємний
1996	758,3	60,52	136,5	18,00	6,5	245,49	
1997	758,5	83,04	202,2	26,66	7,1	245,89	
1998	865,5	54,54	100,2	11,58	7,6	245,63	
1999	674,4	71,69	46,91	6,96	8,7	245,55	
2000	587,1	65,57	52,84	9,00	8,8	245,52	
2001	680,7	53,39	54,05	7,94	6,9	245,52	Додатний
2002	628,0	66,13	89,41	14,24	8,5	245,49	
2003	491,9	82,91	116,49	23,68	7,6	245,61	
2004	684,1	99,84	158,49	23,17	7,9	245,76	Від'ємний
2005	666,1	82,12	105,38	15,82	7,8	245,68	
2006	759,8	54,78	87,21	11,48	7,6	245,53	
2007	681,4	84,28	100,6	14,76	9,1	245,54	Нейтральний
2008	639,6	55,74	70,93	11,09	9,0	245,48	
2009	634,6	69,36	92,26	14,54	8,7	245,48	
2010	629,2	88,81	150,80	23,97	8,3	245,70	Додатний
2011	451,4	78,40	75,78	16,79	8,4	245,51	
2012	666,2	77,10	116,73	17,52	8,2	245,39	
2013	743,7	69,33	132,72	17,85	8,6	245,72	Додатний
2014	539,0	99,61	145,22	26,94	8,7	245,86	
2015	389,2	98,90	148,61	38,18	9,8	245,85	
2016	562,6	94,94	196,43	34,91	9,1	245,79	Додатний
2017	605,1	90,73	151,46	25,03	8,9	245,71	
2018	548,0	76,45	117,82	21,50	8,9	245,07	
2019	486,4	63,76	76,67	15,76	9,5	244,99	Додатний
2020	514,0	36,34	23,90	4,65	10,1	244,65	
Середні	635,0	85,7	145,44	23,0	7,99	245,70	

Суть аномальності окремих періодів (1998–2001, 2002–2005, 2006–2010 та ін.) полягає у невідповідності (диспропорції) між кількістю опадів, ґрунтового стоку, живлення ґрунтових вод та РГВ. У ряді випадків (1991, 1998, 2001, 2006, 2012, 2013 р.) при опадах, вищих за річну норму (635 мм), ґрунтовий стік, живлення та РГВ були непропорційно і абсолютно менші, ніж за опадів, нижчих за норму (1990, 1992, 1994, 2003, 2014, 2015, 2016 р.). Якщо проаналізувати дані по десяти роках із верхньої і нижньої частин таблиці, які представляють відповідно відносно вологий і посушливий періоди, то також простежуються значні невідповідності. За зменшення опадів на 14 % живлення ґрунтових вод зменшилось майже на 50 %, а помітне зростання кількості опадів у 1997–2001 та 2006–2009 рр. супроводжувалось зменшенням живлення ґрунтових вод, і навпаки – зменшення кількості опадів у 2002–2005 та 2014–2017 рр. проявилось у деякому зростанні інфільтраційного живлення і т. п. Загалом з діаграми на рис. 4 видно, що після 1995 р. середнє за кожний виділений етап живлення коливалось у протифазі з опадами (крім

останнього етапу). Значущий позитивний кореляційний зв'язок між живленням та сумою річних опадів для РГВ 0,8–2,3 м після 1988 р. знижується і після 1997 р. майже втрачається, для РГВ 2,7–4,5 м до 1997 р. набуває більшої значущості, проте надалі зменшується. Отже, досить сумнівним виглядає твердження про те, що інфільтраційне живлення ґрунтових вод передусім підпорядковується та напряму залежить від динаміки опадів. Хоча, без сумніву, інфільтраційна волога має атмосферне походження.

К.Д. Ткаченко у праці "Баланс вологи в зоні азрації" показує чотири аспекти однієї проблеми достовірного розрахунку та прогнозування показників режиму ґрунтових вод: 1) природа невідповідності суми прибуткових і витратних складових живлення/розвантаження ґрунтових вод кількості атмосферних опадів; 2) адекватне відображення неоднозначного впливу на живлення ґрунтових вод змін кліматичних умов (в бік континентальності і загального потепління за останні 50 років); 3) врахування при розрахунках та прогнозуванні складових балансу ґрунтових вод метеорологічних чинників "другого плану":

швидкості вітру, насичення повітря водяною парою тощо;
4) можливість прогнозування обсягів стоку (ресурсів)

ґрунтових вод, спираючись на вірогідні прогнози значення кліматичних показників.

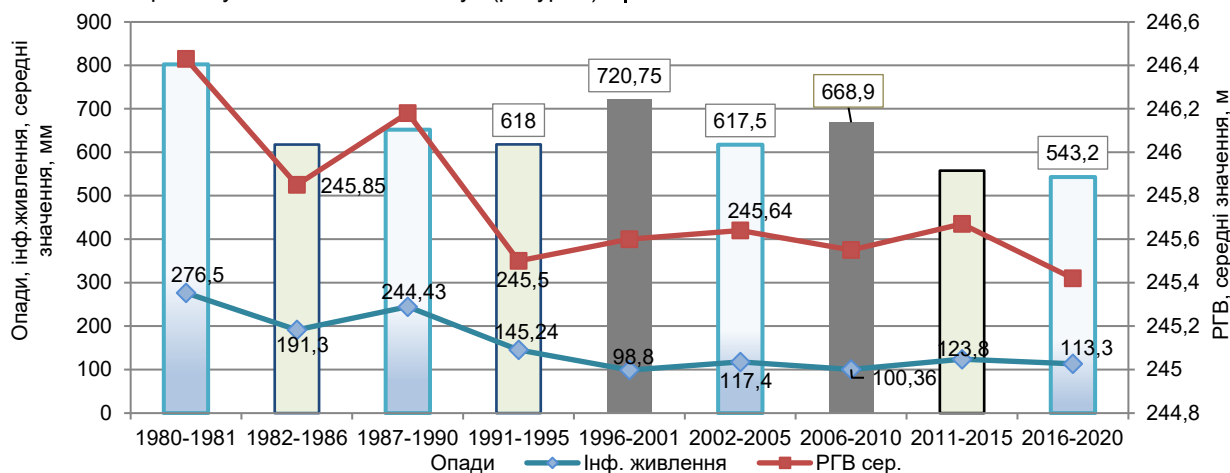


Рис. 4. Специфічні коливання середніх значень опадів, інфільтраційного живлення та РГВ за певні періоди, виділені за знаком заряду статичного електричного поля у приземному шарі атмосфери за аналогією з достеменно встановленими на полігоні "Лютіж" (див. табл. 1)

Серед чинників, які викликають коливання РГВ, є й такі, що безпосередньо не пов'язані із живленням або розвантаженням ґрунтових вод. До них належать гравітаційні сили Місяця і Сонця, баричні коливання атмосфери і слабкі вібромеханічні процеси. На графіках детальних (почасових) замірів РГВ часто відображаються підняття дзеркала ґрунтових вод у денний час і зниження у нічний. Є підстави вважати, що ми маємо справу із гравітаційною силою Сонця. Подібні ж коливання РГВ пов'язані із впливом Місяця, але вони зміщуються в часі залежно від його фази. За різких і значних змін атмосферного тиску РГВ також змінюються – інколи до 15–17 см.

В останні десятиліття проводились спеціальні дослідні роботи в натурних умовах із вивчення механізмів (крім традиційних) руху води в породах ЗА, завдяки яким встановлені нові важливі чинники здатні істотно впливати на розподіл води та показники режиму ґрунтових вод. Серед них найбільшої уваги заслуговують *мікрогеодинамічні і електродинамічні коливання* різного рівня циклічності: добові, місячні, сезонні, річні, багаторічні тощо. Кожен цикл має свої генетичні особливості і певну гідрогеологічну дію. Динаміка і механізм впливу цих сил на геосферу досить складні і мало досліджені. Ми виявили лише окремі ефекти їхньої дії. За даними дослідних робіт, роль механічних сил полягає у формуванні структури геологічного середовища (у т. ч. зон швидкої міграції) і сепарації окремих фаз порід (рідкої, газоподібної, дрібнодисперсної). Механічні коливання (пружні хвилі земної поверхні), які можна віднести до мікросейсмічних, виникають за зміни швидкості обертання Землі і гравітаційних сил Місяця і Сонця (припливно-відпливні процеси).

На сьогодні вже встановлені нові механізми, що впливають на рух порових розчинів у покривних відкладах, завдяки яким виявлені певні закономірні зв'язки між електродинамічними, геодинамічними і гідрогеодинамічними процесами. На підставі цих даних можна пояснити ряд аномальних і неоднозначних явищ, які виникають у наземній і підземній гідросфері за різних ландшафтних умов. Як приклад новими теоретичними розробками можна логічно пояснити, чому в певні періоди волога в ЗА може рухатися в бік більш вологих горизонтів всупереч термодинамічним силам, або чому породи зони аерації западинних форм з аномальними геодинамічними

властивостями, які за механічним складом важчі, ніж фонові і здатні утримувати значно більше води, зневоднюються швидше від фонових, чому розвантаження водоносного горизонту в аномальній зоні за об'ємом і швидкістю значно перевищує розвантаження з фонові ділянки; а також, чому після дощу РГВ знижуються? У цій самій площині лежать відповіді на питання нестабільного режиму хімічного складу підземних вод і багато іншого (Шевченко та ін., 2016).

До провідних чинників вологоперенесення слід зараховувати *напружено-деформаційний стан порід* (Бублясь, 2010). Сейсмічна діяльність Землі може відображатися в режимі підземних вод не лише у вигляді короткочасних сплесків, але і в довгостроковій докорінній зміні умов формування їх ресурсів. Так, за даними (Альтовский, Коноплянцева, 1954), багато джерел після землетрусу в Ашгабаді (1946 р.) збільшили свої дебіти у кілька разів, а рівні підземних вод в одних випадках знизилися, а в інших – піднялися. Подібне явище трапилось в Італії, коли протягом двох років після головного сейсмічного поштовху 2016 р. водоносні горизонти, що живлять річку Нера, розвантажувалися швидше (внаслідок зростання проникності водоносного горизонту та порового водяного тиску з наступними змінами гідравлічного градієнта), що спричинило різке збільшення стоку річки (Di Matteo et al., 2021).

Ефекти зміни рівнів, дебітів і хімічного складу ґрунтових вод інколи зберігалися до кількох років. Так, на полігоні "Лютіж" підвищена мінералізація ґрунтових вод у мікрогеодинамічній зоні, завдяки резонансу стоячої хвилі у 2013 р., спостерігалась упродовж майже двох наступних років. РГВ можуть помітно коливатись також за різких змін напружено-деформаційного стану порід. Так, у річному циклі чітко простежується два підвищення РГВ у періоди прискорення обертання Землі і два зниження – у періоди її уповільненого обертання (рис. 5). Виходячи з даних про вологість порід, така швидкість переміщення води під впливом лише меніскових сил практично неможлива.

Наступним важливим чинником у живленні ґрунтових вод є різного роду *електричні і електромагнітні явища*, які мають низку джерел генерації у геологічному середовищі і приземній атмосфері (Бублясь, 2017). У породах покривних відкладів у результаті затухання автоколивальних пружних хвиль виникають електричні і теплові

поля. Крім того, значні електричні потенціали формуються під час іонізації повітря в порах ґрунтового покриття і порід зони аерації за рахунок розпаду природних радіоактивних елементів (радію, радіоактивного калію, радону, торону, вуглецю та ін.), які в них містяться.

Іонізовані флюїди порід взаємодіють з електричними полями атмосфери. В атмосфері періодично, залежно від знаку полюсів магнітного поля Сонця, температури атмосферних фронтів, характеру зміни напружено-деформаційного стану порід (стиснення, розтягування) формуються переважальні додатні або від'ємні електричні статичні поля, які до поверхневих шарів літосфери притягують протилежні за знаком електричні заряди (іони, електрони), де відбувається так званий обмін

електричними зарядами між атмосферою і літосферою у вигляді електричного струму (Бублясь, 2017). Показники сили електричного струму відображають рух певних (заряджених) матеріальних часток – електронів, іонів, молекулярних заряджених асоціацій у певному фізичному стані (газоподібному, рідкому і високодисперсному твердому). Молекули води, як дипольні системи, за наявності шарів із домінуючими електричними зарядами переміщуються від ділянок (шарів) із позитивними зарядами (анодних) до негативних (катодних полів) як у рідкому, так і в газоподібному стані. Необхідно підкреслити, що волога в пароподібній формі рухається значно швидше, ніж у рідкому стані (Шевченко та ін., 2016).

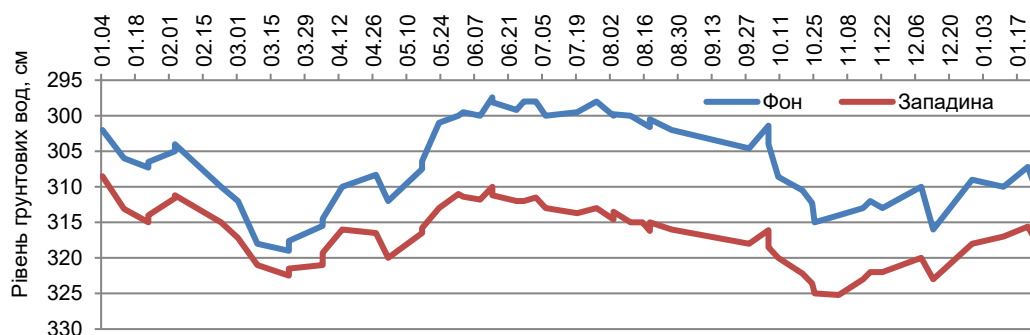


Рис. 5. Характер коливання рівнів ґрунтових вод у режимних свердловинах фоновій ділянці (Ф) і мікрогеодинамічної зони (З) на полігоні "Лютіж" за 2017 р. та січень 2018 р.

За даними експериментів, на рух вологи в ЗА великий вплив має *напруженість статичного електричного поля (Е) приземної атмосфери*. За високих значень E із від'ємним знаком напрямом руху вологи має висхідний характер, завдяки чому випаровування із ЗА збільшується у декілька разів щодо нульових значень E . А напруженість електричного поля приземної атмосфери з додатним знаком формує зворотний рух вологи, призводить до підвищеної інфільтрації порових розчинів. Підтверджується подібна схема також даними замірів вологості порід і вологості приземної атмосфери. Під час сплесків напруженості електромагнітного поля (із знаком мінус) вологість порід може знижуватися до 1–2 %, а вологість повітря над поверхнею ґрунту – збільшуватися до 15–20 % (Шевченко та ін., 2016).

Яскравим прикладом впливу статичного електричного поля на рух порових розчинів є дані режимних спостережень у весняний період 2020 р., коли проявився накладений вплив геодинамічних і активних електро-

динамічних процесів. У другій половині березня і більшій частині квітня швидкість руху Землі прискорювалася, що призвело до геодинамічних рухів (пружних хвиль) в основному у верхніх шарах літосфери. Оскільки затухання пружних хвиль призводить до виникнення п'єзоелектричних полів, то на цей час ми отримали, окрім високих значень змін напружено-деформаційного стану порід, досить високі показники від'ємного статичного електричного поля (рис. 6), яке вплинуло на зменшення вологості і зниження РГВ. Необхідно підкреслити, що в атмосфері в цей час переважав антициклонльний стан погоди ("стан хорошої погоди") і активні фронти, які могли б підвищити статистику, були відсутні. У більшості випадків у цей період спостерігається різкий підйом РГВ (рис. 7), проте 2020 р. був винятковим – РГВ до початку травня не піднімалися, оскільки від'ємні статичні поля активно переміщували вологу із порід ЗА в атмосферу.

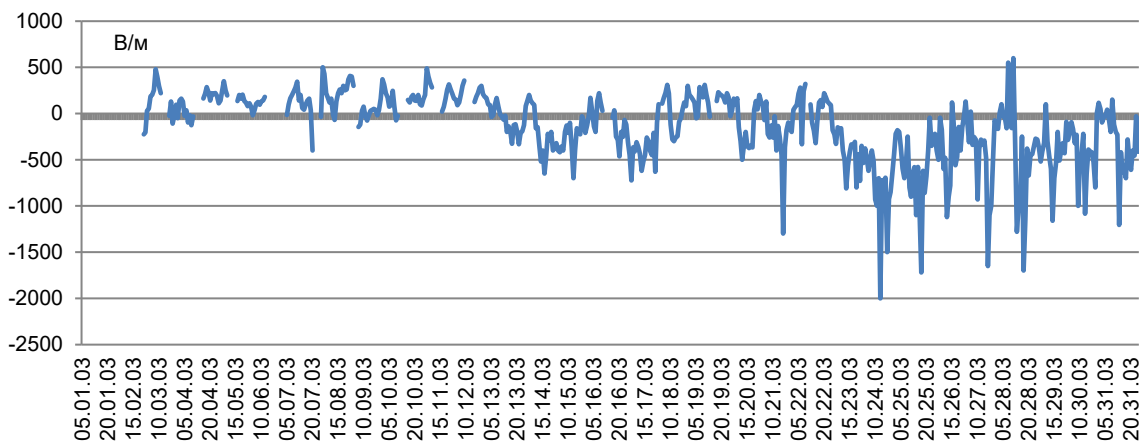


Рис. 6. Коливання напруженості статичного електричного поля приземної атмосфери (В/м) на полігоні "Лютіж" протягом березня 2020 р. під впливом прискорення обертання Землі

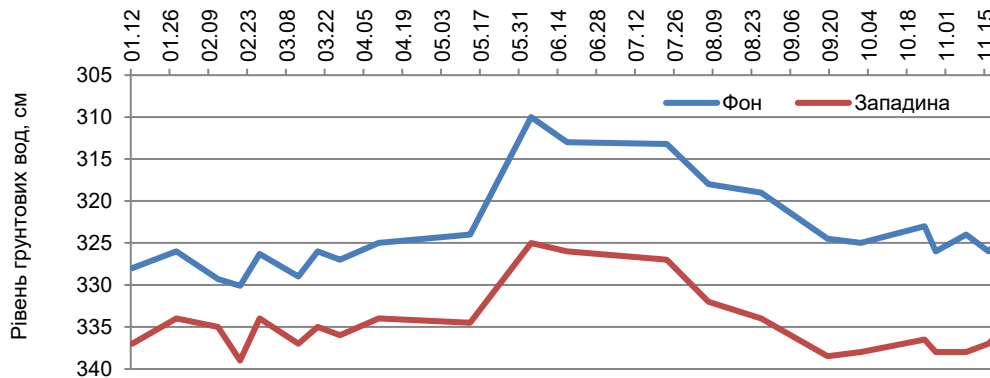


Рис. 7. Коливання рівнів ґрунтових вод в умовах "хорошої" (антициклональної) погоди і від'ємних статичних електричних полів у режимних свердловинах на полігоні "Лютіж" за 2020 р.

Досить потужний вплив на приземну електрику мають атмосферні фронти: отже холодні фронти приносять переважно від'ємні заряди, і в результаті їх дії РГВ знижуються, а теплі фронти приносять додатні заряди, які сприяють підвищенню РГВ (Бублясь В., Бублясь М., 2013). Зовсім інші особливості руху вологи в умовах яскравих грозових дощів із крупними краплями, що несуть на денну поверхню переважно від'ємні заряди. У даному сценарії перенесення вологи простежуються два зустрічні напрямки їх руху – із ґрунтового покриву інфільтрується гравітаційними силами атмосферна волога, а із нижніх горизонтів і ґрунтових вод, за рахунок електродинамічного градієнта, відбувається висхідний рух флюїдів. Як наслідок можуть виникати аномальні явища із різкими стрибками зростання або зниження вологості порід залежно від напружено-деформаційного стану порід і електричних потенціалів.

В умовах структурованої геологічної системи міграція високорухомих складових підпорядковується цій системі і сконцентрована переважно по нестабільних, геодинамічно активних структурних елементах різного рівня – зонах швидкої міграції (ЗШМ), в яких швидкість і об'єм переміщеної вологи може перевищувати те ж саме на фонових ділянках у декілька разів (Бублясь, Шестопалов, 2001). Причина цих аномальних явищ криється у підвищених мікрогеодинамічних і електродинамічних процесах у межах цих специфічних геологічних об'єктів.

Особливу функцію у переміщенні вологи відіграють мікрогеодинамічні зони (МГЗ), оскільки вони є генераторами

вібромеханічних коливань, і певних електричних полів, які нерідко відрізняються від фонових за величиною і знаком, що створює ефекти біполярного поля в геологічному середовищі на окремих ділянках (Бублясь, 2006). А тому часто спостерігаються аномальні явища, коли у свердловині на фонівій ділянці РГВ піднімаються, а в МГЗ знижуються завдяки протилежно спрямованим потокам вологи.

Завдяки значній водозбірній площі западинних морфоскульптур через їх зони швидкої міграції проходить у 2–4 рази більше вологи, ніж через породи ЗА фонових ділянок (Бублясь, Шестопалов, 2001). Якщо значний об'єм вологи в МГЗ пояснюється впливом мікрорельєфу, то аномально високу швидкість переміщення вологи лише гравітаційними і капілярними силами пояснити не можна. У даному випадку маємо яскравий приклад роботи електричних сил. Процеси зволоження і зневоднення потужніші саме в ЗШМ, де градієнти електричних потенціалів вищі.

Достатньо чутливою до зміни електричних явищ є волога порід ЗА (рис. 8): зміни знаку заряду статичного електричного поля визначають напрямок руху вологи – висхідний або низхідний. Розглянемо період із відносно нейтральними статичними полями (2011–2015 рр.), коли у першій половині цього циклу електромагнітних хвиль із від'ємними зарядами було більше, ніж у другій половині, коли переважали додатні заряди. У результаті цієї взаємодії у 2011 і 2012 рр. запас вологи в ґрунті був значно менший, ніж у другій половині цього циклу 2013–2014 рр. (рис. 8). Хоча сума опадів у першій половині циклу була на 220 мм більша, ніж у другій половині(!).

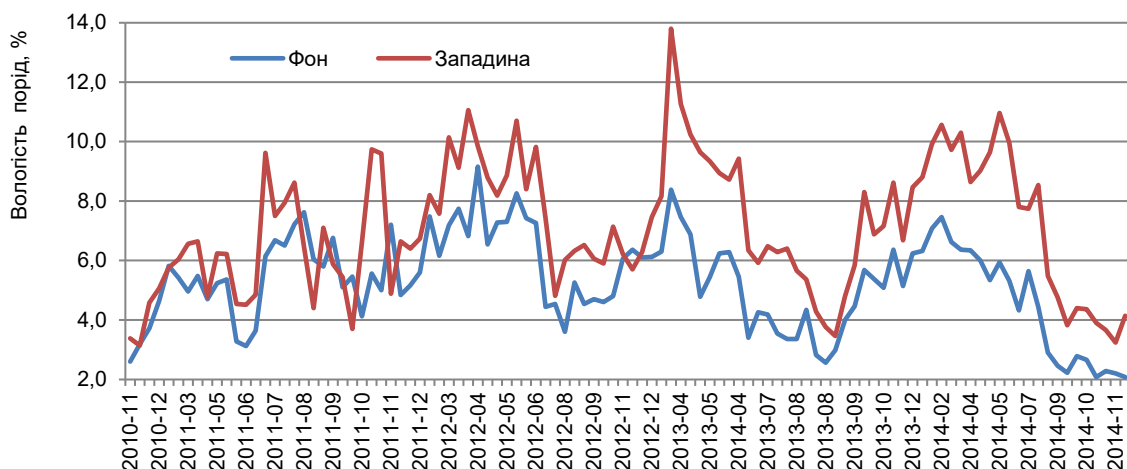


Рис. 8. Характер зміни вологості порід (середні значення) зони аерації, визначеної термостатно-ваговим методом, які відображають особливості їх зволоження і висихання в перехідний період від від'ємних статичних електричних полів до додатних у межах фоновій ділянки (Ф) і МГЗ (З) на полігоні "Лютіж" за період 2010–2014 рр.

Тепер повернемося до пояснення аномальних явищ, представлених у таблиці 1. Виходячи з детальних досліджень чинників, що впливають на рух поверхневих і ґрунтових вод, більш аргументовано можна оцінювати гідрогеологічні явища за період з 2003 по 2020 р. завдяки детальним дослідним роботам на полігоні "Лютіж". За даними режимних спостережень, виділяються періоди із чіткими додатними – 2002–2005, 2016–2020 рр., від'ємними – 2006–2010 рр., нейтральними (немає виражених ознак додатних або від'ємних полів) – 2011–2015 рр. статичними електричними полями. У періоди з додатними статичними полями (2016–2020 рр.), за відносно невеликих опадів, величини живлення ґрунтових вод були вищі, ніж за період із від'ємними статичними полями (2006–2010 рр.), коли опади були вищі за норму. А як уже було зазначено, за від'ємних статичних полів приземної атмосфери волога в зоні аерації має переважно висхідний напрямок руху – до земної поверхні і швидко випаровується, тоді як при переважаючих додатних полях спостерігається низхідний напрямок руху вологи – до водоносного горизонту. Тому навіть за відносно незначних опадів (2015–2019 рр.) величини живлення ґрунтових вод виявились досить високими. На підставі

результатів даного аналізу можна екстраполювати встановлені закономірності і на верхню частину таблиці 1.

Якщо відібрати розрахункові значення інфільтраційного живлення лише за теплий період року (травень-жовтень) та розділити їх по періодах із достеменно встановленим знаком заряду статичного поля приземного шару атмосфери, то дуже добре видно (рис. 9), що, незважаючи на зменшення кількості опадів (P), зростання дефіциту вологості повітря (рис. 9, 10а), з яким інфільтрація має достатньо високу негативну кореляцію ($-0,6$ за 41 рік), середньомісячне інфільтраційне живлення зросло майже на 30 % за позитивних значень заряду статичного поля (порівняно із від'ємним). Якщо ж розглядати лише період з позитивним зарядом 2016–2020 рр., то при $P=59$ мм, ДВП=6,8 гПа, температура зросла до $16,8^{\circ}\text{C}$, а інфільтрація до 8,9 мм. Крім того, виявилось, що за від'ємного заряду зустрічається майже 50 % випадків (вибірка за 30 місяців) із від'ємним живленням (найбільше у 2006 і 2008 рр. – по 4 місяці), тобто переважанням евапотранспірації та втрат на насичення зони аерації над інфільтрацією. За нейтрального заряду таких значень 33 % (10 із 30), а за позитивних зарядів – 22 % (якщо брати лише 2016–2020 рр., то 20 %).

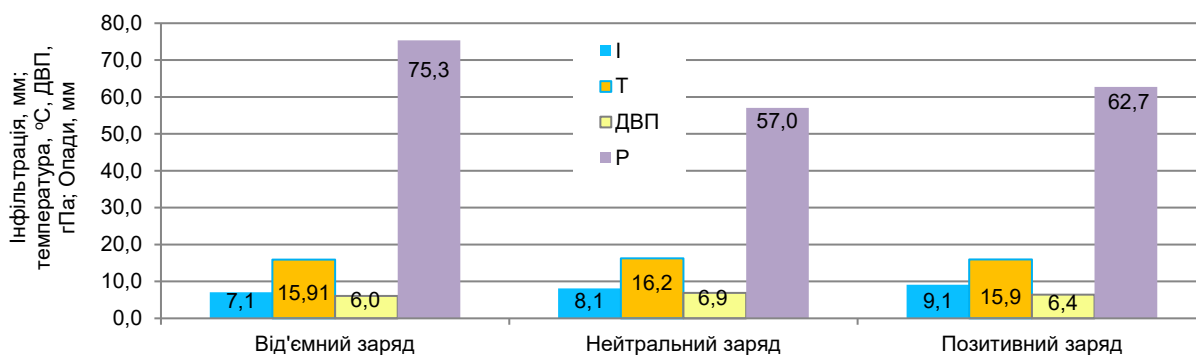


Рис. 9. Коливання інфільтраційного живлення теплого періоду року (травень-жовтень) на ділянці з РГВ 0,8–2,3 м у зіставленні із середньомісячними значеннями метеорологічних чинників: температурою (T), дефіцитом вологості повітря (ДВП) та опадами (P) за періоди з від'ємним (2006–2010 рр.), нейтральним (2011–2015 рр.) і позитивним (2002–2005, 2016–2020 рр.) зарядом статичного поля приземного шару атмосфери

Вітер є похідним явищем від переміщень повітряних мас в атмосфері, зумовлених наявністю баричних градієнтів. Ці переміщення за певних циркуляційних умов зумовлюють появу теплих або холодних атмосферних фронтів. Принаймні розумімо, що сила (або швидкість) вітру відіграє важливу роль у розподілі вологи на поверхні ґрунту. Аналізуючи сезонний розподіл інфільтраційного живлення на ділянках з різним діапазоном коливань РГВ, можна припустити, що на інфільтраційне живлення літнього періоду істотно вплинуло поєднання кількох чинників: РГВ, температури повітря, кількості та характеру розподілу опадів і *швидкості вітру*. Останнє коливається у протифазі із сезонним ходом температури повітря, тобто набуває мінімальних значень у літній період. На ділянках з РГВ 0,8–2,3 м після 1989 р. живлення під час літнього сезону було більшим за таке у весняний період. Можна припустити, що зменшенню інфільтраційного живлення за літній період 1989–2014 рр. на ділянках з високими РГВ протидіяло зниження сили вітру (рис. 10б) та сприятливий затяжний характер опадів. Так, швидкість вітру з 1980 по 2019 р. знизилась на 0,8 м/с, тобто на 0,2 м/с за кожні 10 років. Цей показник є досить високим, оскільки в середньому у світі сила вітру зменшувалась за цей час з інтенсивністю 0,14 м/с. Звісно, крім цього, слід аналізувати ступінь насичення повітря водяною парою,

оскільки високе насичення або низький парціальний тиск пари також стримує випаровування.

Таким чином показано, що зниження РГВ у 2015–2020 рр. пов'язане не лише із зменшенням кількості опадів та зростанням випаровування. По-перше, істотного зниження кількості опадів не відбувалось, хоча, звісно, аномально низька їх кількість у 2015 та 2019 рр. загострила рецесію РГВ. Проте, зважаючи на інертність або значну уповільненість процесів вологоперенесення та фільтрації, порівняно з рухом вільної води, слід враховувати чинники, які достатньо помітно проявили себе у попередні періоди. З аналізу показників режиму та розрахунків підземного стоку і балансу ґрунтових та поверхневих вод стає очевидним, що передумови зниження РГВ були закладені ще у 80–90-ті роки. Спочатку підвищення температури зимового сезону сприяло посиленню живлення ґрунтових вод, зростанню РГВ, проте – зменшенню повневіх витрат річок, а згодом, за сезонного перерозподілу опадів і деякого їх зменшення, – загальному зменшенню стоку річок. Отже, спочатку, з 2003–2004 рр., склались передумови *гідрологічної посухи*. Зменшення рівнів води в річках, а отже і зниження базису ерозії призвело до стрімкого *збільшення градієнтів дренажного стоку* і, як наслідок, спрацювання запасів ґрунтових вод. Ці тенденції посилювались

починаючи з 2010–2011 рр. завдяки зменшенню кількості зимових опадів, деякому зниженню зимових температур, а також завдяки зростанню літніх температур. І коли за від'ємного балансу, зумовленого підвищеним бічним відтоком, та різкого зниження кількості опадів у 2015 р., інфільтраційного поповнення ґрунтових вод виявилось недостатньо, гостро проявився ефект *гідрогеологічної*

посухи – а зонального зниження РГВ на значній території. Негативні наслідки могли б бути ще більш разючими, якби на період 2016–2020 рр. статичне електричне поле приземної атмосфери не мало позитивного заряду (див. табл. 1), який спрямовував низхідні потоки пароподібної вологи через порове середовище зони аерації.

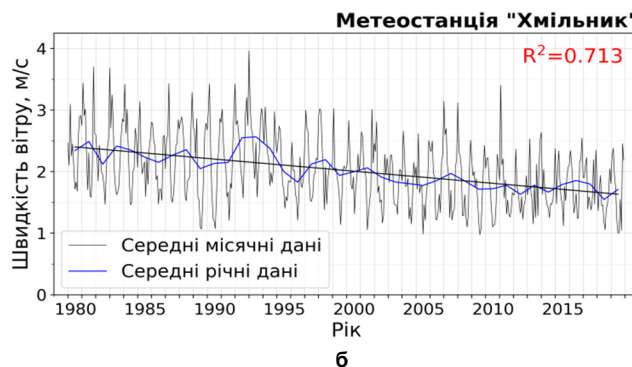
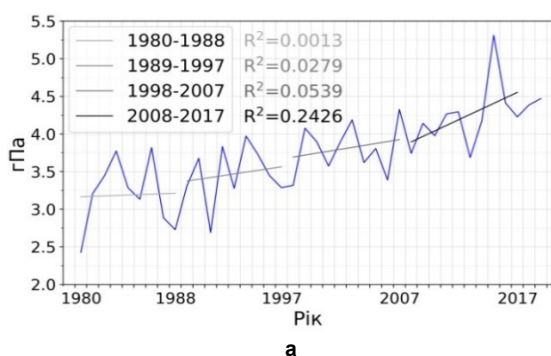


Рис. 10. Зміни дефіциту вологості повітря по етапах (а) та швидкості вітру за період з 1980 по 2019 р. (б) за даними МС "Хмільник"

Отже, приклад розвитку гідрогеологічної посухи в Україні добре демонструє тісний зв'язок та зумовленість водообміну у верхній частині розрізу не лише кліматичними і гідродинамічними, а й електродинамічними процесами та явищами. Комбінований аналіз геофізичної, метеорологічної, гідрогеологічної та гідрофізичної інформації доводить доцільність *продовження досліджень* щонайменше за трьома напрямками: 1) розробка комбінованих математичних моделей, що описують залежність інфільтраційного живлення від гідродинамічних (РГВ), метеорологічних (опадів, температура, дефіцит вологості повітря, швидкість вітру тощо), геофізичних (напруженість електричного поля приземної атмосфери) та геодинамічних чинників; 2) розвиток методології суміщених синхронних гідрометеорологічних, гідрогеологічних, гідрофізичних та геофізичних спостережень, вдосконалення відповідної апаратури; 3) розробка методів штучного локального регулювання заряду статичного електричного поля для поповнення запасів ґрунтових вод та протидії гідрогеологічній посуші.

Висновки. За даними 41-річних спостережень по моніторингових свердловинах у м. Хмільник визначено кількісні зміни живлення ґрунтових вод. Середнє багаторічне інфільтраційне живлення ґрунтових вод на ділянці з коливаннями РГВ в діапазоні 0,8–2,3 м від поверхні склало 145 мм/рік, а за РГВ 2,7–4,5 м – лише 14,7 мм/рік (діапазон змін від 129 мм до негативних значень). Значуща кореляція між річними значеннями інфільтрації та опадів за РГВ 0,8–2,3 м спостерігалась лише на першому етапі спостережень (1980–1988 рр.) і сягала 0,75. По сезонах значущий зв'язок з опадами існував лише до 1997 р. для літа й осені; на цьому етапі також відмічено високу кореляцію між температурою та інфільтрацією зимового періоду.

Зіставлення місячних, сезонних та річних сумарних значень живлення із значеннями режимоформуючих метеорологічних чинників підтверджує висновок про те, що в період глобального потепління переважного значення набувають нові чинники, що пов'язано з посиленням ролі раніше малозначущих механізмів вологоперенесення. В умовах зміни інфільтраційного режиму ґрунтових вод на інфільтраційно-випарний підвищилась роль конденсації пароподібної вологи у живленні ґрунтових вод, що є однією з головних ознак впливу глобального підвищення

температури на процеси водообміну. Процес надходження пароподібної вологи на РГВ регулюється знаком заряду статичного електричного поля приземного шару атмосфери. Завдяки додатним зарядам цього поля (а вірогідно й зменшенню сили вітру) низька кількість опадів за 2014–2017 рр. (середнє значення 524 мм) супроводжувалась високим живленням ґрунтових вод (160 мм – на 10 % вище норми), стабільним підземним стоком до річки в межах 90–100 м³/рік/м та навіть незначним зростанням РГВ.

Для прогнозних розрахунків інфільтрації слід використовувати не лише РГВ, температуру та кількість опадів, як це здебільшого прийнято, а й градієнти електричного струму, генерованого пружними силами (мікрогеодинамічними коливаннями земної поверхні) і електричними полями, які мають зв'язок із сонячною радіацією, атмосферними фронтами та опадами. Для виконання достовірних сценаріїв гідрогеологічних та гідрологічних прогнозів необхідно розвивати мережу балансових станцій, на яких можуть одночасно відстежуватися метеорологічні, гідрологічні, гідрофізичні та гідрогеологічні показники. Аналіз таких спостережень у поєднанні з регіональними характеристиками змін клімату та поверхневого стоку дозволить виконувати реалістичні прогнози для завчасного передбачення гідрогеологічної посухи.

Оцінка представлених результатів дослідження показує, що хвилеподібні коливальні рухи, які формуються у поверхневих відкладах під впливом гравітаційних і ротаційних сил, контролюють більшість енергомасообмінних процесів. Фізична сутність впливу геодинамічних коливань у породах представлена двома стадіями: 1) під час вібраційних процесів відбувається віджимання води з породи за принципом сепарації складових порід за щільністю; 2) переміщення електричними силами цих розчинів у напрямку горизонтів із від'ємними електричними потенціалами.

Отже, електричні поля та генеровані електричні струми, не пов'язані із сучасним підвищенням температури, здатні, в разі створення статичних полів із додатним зарядом, протидіяти загальним процесам виснаження ємнісних запасів ґрунтових вод.

Результати дослідження нових механізмів, що впливають на рух флюїдів у геологічному середовищі і циклічності їхньої зміни, є більш прогресивним підходом до прогнозування стану ресурсів не лише ґрунтових вод, але і підземних вод глибоких горизонтів.

Список використаних джерел

- Альтовський, М.Є., Коноплянцев, А.А. (1954). Методическое руководство по изучению режима подземных вод. "Госгеолтехиздат", 253.
- Бублясь, В.М. (2017). Електричні явища атмосфери і літосфери та їх роль у геологічних процесах. *Матеріали IV міжнар. геол. форуму до 60-річчя УкрДГРІ "Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука і виробництво"*, Київ, 19–24.
- Бублясь, В.М. (2006). Мікрогеодинамічні зони як елементарні складові структури літосфери і роль електромагнітних явищ в їх розвитку. *Збірник наукових праць КНУ "Енергетика Землі, її геолого-екологічні прояви, науково-практичне використання"*, Київ, 86–90.
- Бублясь, В.Н. (2010). Закономірності зміни напружено-деформаційного стану порід в мікрогеодинамічних зонах, розвинених в покривних відкладах рівнинних територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 51, 44–48.
- Бублясь, В.Н., Бублясь, М.В. (2013). Процеси і явища в мікрогеодинамічних зонах покривних відкладів рівнинних територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(60), 42–46.
- Бублясь, В.М., Шестопалов, В.М. (2001). Аномальні зони і їх роль в перерасподіленні радіонуклідів з поверхні ґрунту в підземні води. В кн. *Водообмін в гідрогеологічних структурах і Чернобыльская катастрофа*. Ч. 1. Київ, 251–356.
- Вольфцун, И.Б. (1972). Расчеты элементов баланса грунтовых вод. Ленинград: Гидрометеиздат, 272.
- Гриневский, С.О. (2012). Оценка инфильтрационного питания и ресурсов подземных вод на основе геогеологических моделей. *Автореф. дис. ... д-ра геол.-минералог. наук: 25.00.07 гидрогеология*. Москва, 44. Отримано з <http://earthpapers.net/preview/354368/a/#?page=1>
- Жернов, И.Е. (1982). Динамика подземных вод. Киев, 323.
- Киселев, П.А. (1967). Гидродинамические принципы количественной оценки питания подземных вод на основе анализа их режима на территории Белоруссии. *Режим и баланс подземных вод*. Минск, 3–92.
- Лукнер, Л., Шестаков, В.М. (1986). Моделирование миграции подземных вод. Москва, 208.
- Ситников, А.Б., Головаченко, Ю.Г., Ткаченко, К.Д. (2003). Гидрогеологическая станция "Феофанія": многолетние исследования и результаты. Киев, 200.
- Ситников, А.Б. (2010). Вопросы миграции веществ в грунтах. К.: НАН Украины. Ін-т геол. наук, 626.
- Стан підземних вод України у 2019 році. (2020). Щорічник. Київ: ДНВП "ГЕОІНФОРМ України", 129.
- Ткаченко, К.Д. (1965). Баланс влаги в зоне аэрации. Киев, 144.
- Тэйлор, С.А., Кэри Дж. В. (1966). Анализ одновременных потоков воды и тепла или электричества с помощью термодинамики необратимых процессов. Термодинамика почвенной влаги. Ленинград.
- Шевченко, О.Л., Бублясь, В.М., Коломийць, С.С. (2016). Основи перенесення вологи в зоні аерації. Навч. посібник. Київ, 295.
- Шевченко, А.Л., Наседкин, И.Ю. (2001). Естественно-антропогенные особенности формирования водообмена и распространения радиоактивных веществ на мелиоративных системах гумидной зоны. В кн. *Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа*. Ч. 1. Киев, 162–232.
- Шевченко, О.Л., Осадчий, В.І. (2020). Прояви глобального потепління у змінах балансу підземних вод та річок. Ресурси природних вод Карпатського регіону. *Матеріали 19-ї міжнар. наук-практ. конф. "Проблеми охорони та раціонального використання"*, 8–9 жовтня 2020 р., м. Львів, 36-к наук. статей, 70–74.
- Шевченко, А.Л., Осадчий, В.І., Чарний, Д.В. (2019). Изменения режима. баланса и ресурсов подземных вод Полесья и лесостепи Украины под влиянием глобального потепления. *Вучоные записки Бресцкага універсітэта*, 15 (2), 117–128.
- Шевченко, О.Л., Скорбун, А.Д., Чарний, Д.В. (2021). Підпорядкованість коливань рівнів ґрунтових вод в басейні р. Південний Буг кліматичним змінам. *Вісник Одеського НУ. Сер.: Географічні та геологічні науки*, 26, 2(39), 175–194.
- Шевченко, А.Л., Чарний, Д.В., Осадчий, В.І., Ільченко А.О. (2021а). Стік ґрунтових вод у басейні річки Південний Буг в умовах глобального потепління. *Геологічний журнал*, 3, 3–16. doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.3.237361
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. Mc Graw-Hill, Inc., New York.
- Brechtel, H.M. (1976). Influence of species and age of forest stands on evapotranspiration and ground water recharge in the Rhine-Main Valley. *Proceedings of XVI IUFRO World Congress, Oslo, Norway*.
- Busch, K.-F., Luckner, L. and Tiemer, K. (1993). *Geohydraulik*. In: Matthess, G. (Ed.) Gebrüder Bornträger. Berlin, Stuttgart, 3. Neubearbeitete Auflage.
- Di Matteo, L., Capoccioni, A., Porreca, M., Pauselli, C. (2021). Groundwater-Surface Water Interaction in the Nera River Basin (Central Italy): New Insight safter the 2016 Seismic Sequence. *Hydrology*, 8, 97.
- Dubois, E., Larocque, M., 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, 19–30 Apr 2021*. EGU21-6039. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6039>.
- Carrera-Hernández, J.J., Smerdon, B.D., Mendoza, C.A. (2012). Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. *Journal of Hydrology*, 452–453, 90–101.
- Carvalho, K.S., Wang, S. (2019). Characterizing the Indian Ocean Sea level changes and potential coastal flooding impacts under global warming. *Journal of Hydrology*, 569, 373–386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.072>
- Chen, H., Wang, S., Wang, Y., Zhu, J. (2020). Probabilistic projections of hydrological droughts through Convection-Permitting climate simulations and multimodel hydrological predictions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125. 10.1029/2020JD032914.
- Gee, G.W., Hillel, D. (1988). Groundwater recharge in arid regions: review and critique of estimation methods. *Hydrological processes*, 2, 255–266.
- Healy, R.W., Cook, P.G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91–109.
- Kuzmak, J.H. Sereda, P.J. (1957). The mechanism by which water moves through a porous material subjected to a temperature gradient. *Soil science*, 84, (4. 5)
- Liu, C., Ikeda, K., Rasmussen, R., Barlage, M., Newman, A.J., Prein, A.F. et al. (2017). Continental-scale convection-permitting modeling of the current and future climate of North America. *Climate Dynamics*, 49(1–2), 71–95. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3327-9>
- Maxwell, R.M. (2010). Infiltration in arid environments: Spatial patterns between subsurface heterogeneity and water-energy balances. *Vadose Zone Journal*, 9, 970–983. DOI: 10.2136/vzj2010.0014
- Modarres, R. (2007). Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21(3), 223–233. <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0058-1>
- Osadchyi, V., Shevchenko, O., Krasovska, A. (2021). Formation features of river underground runoff under global warming conditions. *EGU General Assembly 2021, 19–30 Apr 2021*. EGU21-15311. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15311>
- Qurtas, S.Sh. (2018). Using ground water level sand specific yield to estimate the recharge. South of Erbil. Kurdistan Region. Iraq. *Academic Journal of Nawroz University, [S.I.]*, 7(4), 191–196. <https://doi.org/10.25007/ajnu.v7n4a289>
- Rasmussen, K.L., Prein, A.F., Rasmussen, R.M., Ikeda, K., Liu, C. (2017). Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States. *Climate Dynamics*, 55(1–2), 383–408. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4000-7>
- Tabari, H., Nikbakht, J., Talaei, P.H. (2013). Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water Resources Management*, 27(1), 137–151. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0173-3>

References

- Altovskiy, M.Ye., Konoplyantseva, A.A. (1954). Methodological guide to the study of the groundwater regime. Gosgeoltekhnizdat, 253. [in Russian]
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. Mc Graw-Hill, Inc., New York.
- Brechtel, H.M. (1976). Influence of species and age of forest stands on evapotranspiration and ground water recharge in the Rhine-Main Valley. *Proceedings of XVI IUFRO World Congress, Oslo, Norway*.
- Bublyas, V.M. (2017). Electrical phenomena of the atmosphere and lithosphere and their role in geological processes. *Materials of the IV International. geol. Forum for the 60th anniversary of UkrDGRI "Actual problems and prospects for the development of geology: science and production"*, Kyiv, 19–24. [in Ukrainian]
- Bublyas, V.M. (2006). Microgeodynamic zones as elementary structural components of the lithosphere and the role of electromagnetic phenomena in their development. *Collection of scientific works of KNU. Energy of the Earth. Its geological and ecological manifestations. Scientific and practical use*. Kyiv, 86–90. [in Ukrainian]
- Bublyas, V.M. (2010). Patterns of changes in the stress-strain state of rocks in microgeodynamic zones developed in the cover sediments of plain areas. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 51, 44–48. [in Ukrainian]
- Bublyas, V.N., Bublyas, M.V. (2013). Processes and phenomena in microgeodynamic zones of cover deposits of plain territories. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(60), 42–46. [in Ukrainian]
- Bublyas, V.M., Shestopalov, V.M. (2001). Anomalous zone sand their role in the redistribution of radionuclides from the soil surface to groundwater. In: *Water exchange in hydrogeological structures and the Chernobyl disaster*. Part 1. Kyiv, 251–356. [in Russian]
- Busch, K.-F., Luckner, L., Tiemer, K. (1993). *Geohydraulik*. In: Matthess, G. (Ed.) Gebrüder Bornträger. Berlin, Stuttgart, 3. Neubearbeitete Auflage.
- Carrera-Hernández, J.J., Smerdon, B.D., Mendoza, C.A. (2012). Estimating groundwater recharge through unsaturated flow modelling: Sensitivity to boundary conditions and vertical discretization. *Journal of Hydrology*, 452–453, 90–101.
- Carvalho, K.S., Wang, S. (2019). Characterizing the Indian Ocean Sea level changes and potential coastal flooding impacts under global warming. *Journal of Hydrology*, 569, 373–386. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.072>
- Chen, H., Wang, S., Wang, Y., Zhu, J. (2020). Probabilistic Projections of Hydrological Droughts Through Convection-Permitting Climate Simulations and Multimodel Hydrological Predictions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125.
- Di Matteo, L., Capoccioni, A., Porreca, M., Pauselli, C. (2021). Groundwater-Surface Water Interaction in the Nera River Basin (Central Italy): New Insight safter the 2016 Seismic Sequence. *Hydrology*, 8, 97.

- Dubois, E., Larocque, M., 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, 19–30 Apr 2021. EGU21-6039. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6039>.
- Gee, G.W., Hillel, D. (1988). Groundwater recharge in arid regions: review and critique of estimation methods. *Hydrological processes*, 2, 255–266.
- Grinevsky, S.O. (2012). Assessment of infiltration recharge and groundwater resources based on geohydrological models. Dissertation abstract for the competition doc. geol.-min. sciences in specialty "hydrogeology". Moscow, 44. <http://earthpapers.net/preview/354368/a#?page=1> [in Russian]
- Healy, R.W., Cook, P.G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, 91–109.
- Kiselev, P.A. (1967). Hydrodynamic principles of quantitative assessment of groundwater recharge based on the analysis of their regime on the territory of Belarus. *Groundwater regime and balance*. Minsk, 3–92.
- Kuzmak, J.H., Sereda, P.J. (1957). The mechanism by which water moves through a porous material subjected to a temperature gradient. *Soil science*, 84, (4, 5).
- Liu, C., Ikeda, K., Rasmussen, R., Barlage, M., Newman, A.J., Prein, A.F. et al. (2017). Continental-scale convection-permitting modeling of the current and future climate of North America. *Climate Dynamics*, 49(1–2), 71–95.
- Lukner L., Shestakov, V.M. (1986). Modeling of groundwater migration. Moscow, 208. [in Russian]
- Maxwell, R.M. (2010). Infiltration in arid environments: Spatial patterns between subsurface heterogeneity and water-energy balances. *Vadose Zone Journal*, 9, 970–983. DOI: 10.2136/vzj2010.0014
- Modarres, R. (2007). Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21(3), 223–233. <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0058-1>
- Osadchyi, V., Shevchenko, O., Krasovska, A. (2021). Formation features of river underground runoff under global warming conditions. EGU General Assembly 2021, 19–30 Apr 2021. EGU21-15311. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-15311>
- Qurtas, S.Sh. (2018). Using groundwater levels and Specific Yield to Estimate the Recharge. South of Erbil. Kurdistan Region. Iraq. *Academic Journal of Nawroz University*, [S.l.], 7(4), 191–196. <https://doi.org/10.25007/ajnu.v7n4a289>
- Rasmussen, K.L., Prein, A.F., Rasmussen, R.M., Ikeda, K., Liu, C. (2017). Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States. *Climate Dynamics*, 55(1–2), 383–408. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4000-7>
- Shevchenko, O.L., Bublyas', V.M., Kolomiets, S.S. (2016). Basics of moisture transfer in the aeration zone. Training manual. Kyiv, 295. [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. In: *Water exchange in hydrogeological structures and the Chernobyl disaster*. Part 1. Kiev, 162–232. [in Russian]
- Shevchenko, O.L., Osadchyi, V.I. (2020). Manifestations of global warming in changes in the balance of groundwater and rivers. Natural water resources of the Carpathian region. Materials of the 19th intern. conf. "Problems of protection and rational use", October 8–9, 2020, Lviv, 70–74. [in Ukrainian]
- Shevchenko, A.L., Osadchyi, V.I., Charny, D.V. (2019). Mode changes, balance and resources of groundwaters of Polesia and forest-steppe of Ukraine under the influence of global warming. *Academic notes of Brest University*, 15(2), 117–128. [in Russian]
- Shevchenko, O.L., Skorbun, A.D., Charny, D.V. (2021). Subordination of groundwater level fluctuations in the Southern Bug River basin to climatic changes. *Visnyk of Odesa National University. Ser.: Geographical and geological sciences*, 26, 2(39), 175–194. [in Ukrainian]
- Shevchenko, A.L., Charny, D.V., Osadchyi, V.I., Il'chenko, A.O. (2021a). Groundwater flow in the Southern Bug basin river in conditions of global warming. *Geological journal*, 3, 3–16. [in Ukrainian]
- Sitnikov, A.B., Golovchenko, Yu.G., Tkachenko, K.D. (2003). Hydrogeological station "Feofaniya": long-term studies and results. Kyiv, 200. [in Russian]
- Sitnikov, A.B. (2010). Issues of migration of substances in soils. Kyiv, 626. [in Russian]
- Tabari, H., Nikbakht, J., Talaei, P.H. (2013). Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water Resources Management*, 27(1), 137–151. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0173-3>
- Taylor, S.A., Carey, J.V. (1966). Analysis of simultaneous flows of water and heat or electricity with the help of thermodynamics of irreversible processes. *Thermodynamics of soil moisture*. Leningrad. [in Russian]
- The state of groundwater in Ukraine in 2019. (2020). Shchorichnyk, Kyiv: DNVP "GEOINFORM of Ukraine", 129. http://geoinf.kiev.ua/Schorichnyk_PV_2019.pdf. [in Ukrainian]
- Tkachenko, K.D. (1965). Moisture balance in the aeration zone. Kyiv: "Scientific Thought", 144. [in Russian]
- Zhernov, I.E. (1982). Dynamics of underground waters. Kyiv, 323. [in Russian]
- Wolfzun, I.B. (1972). Calculations of groundwater balance elements. Leningrad, 272. [in Russian]

Надійшла до редколегії 14.08.22

O. Shevchenko, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: shevch62@gmail.com,
Ukrainian Hydrometeorological Institute NAS of Ukraine,
37 Nauki Ave., Kyiv, 03028, Ukraine;
V. Bublyas, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: bubliav51@gmail.com,
Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine,
55-b O. Honchara Str., Kyiv, 01054, Ukraine;
D. Oshurok, PhD (Geogr.), Senior Researcher,
E-mail: oshurok.dm@gmail.com,
Ukrainian Hydrometeorological Institute NAS of Ukraine,
37 Nauki Ave., Kyiv, 03028, Ukraine

COMBINATION OF GEOPHYSICAL AND HYDROGEOLOGICAL DATA TO EXPLAIN CONTRADICTIONS BETWEEN INFILTRATION AND ATMOSPHERIC PRECIPITATION

A traditional and non-standard approach to the analysis of estimated values of groundwater infiltration feeding using the charge sign of the electric field of the surface atmosphere is considered. A comparison of the results of hydrogeological calculations and observations from specific electrophysical and meteorological factors made it possible to explain the discrepancies between the values of infiltration nutrition and the amount of precipitation.

The daily values of groundwater recharge were determined based on 41-year observations in wells in the city Khmelnyk. The average long-term value of infiltration recharge of groundwater from GWT 0.8–2.3 m was 145 mm, from GWT 2.7–4.5 m – 14.7 mm (fluctuations in the range from 129 mm to negative values). A significant correlation between the annual values of infiltration and precipitation at GWT 0.8–2.3 m was observed only at the first stage of observations (1980–1988). However, there are also significant contradictions in the ratios of infiltration and precipitation, which could be explained only by involving the data of our own electrophysical observations. For the period from 2008 to 2017, the negative values of the "infiltration-temperature" correlation coefficients for the summer season changed to positive ones, which suggests an increase in the importance of moisture transfer mechanisms in the form of steam. Data on the charge sign of the static electric field of the surface layer of the atmosphere support this conclusion. At high values of the intensity of the static electric field (E) with a negative sign, the direction of moisture movement has an upward character, thanks to which evaporation from the aeration zone increases several times compared to what happens at zero values of E. And the intensity of the electric field with a positive sign forms a downward movement of moisture, which leads to an increase of GWT. From this, the cases when low values of infiltration nutrition were obtained with a significant amount of precipitation become more understandable. Conversely, the low amount of precipitation in 2014–2017 (average value 524 mm) was accompanied by high groundwater recharge (160 mm – 10 % above the norm), stable underground flow to the river in the range of 90–100 m³/year/m and by the growth of GWT due to the positive values of the static electric field and the decrease in wind strength. This electrical factor has such a powerful influence that it is able to neutralize and effectively counteract the negative impact on groundwater recharge of temperature rise and air humidity deficiency.

Since electrodynamic processes have a significant and sometimes decisive role not only in moisture transport in the aeration zone, but also in regional processes of groundwater feeding, the creation of artificial positively charged static fields above the soil surface can become the most effective safeguard against the depletion of groundwater reserves during hydrogeological drought.

Keywords: infiltration, supply, unloading, groundwater levels, regime, temperature, precipitation, balance, aeration zone, electrodynamics.