

ЧИСЛОВІ МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ В ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЇ

О.Л. Шевченко

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

Український гідрометеорологічний інститут
Державної служби України
з надзвичайних ситуацій та
Національної академії наук
України, Київ, Україна

УДК 556.388:621.039.75

ЛОГІЧНО-АПРІОРНИЙ АНАЛІЗ В ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ

У статті продемонстровано на прикладах, що за браку вхідної інформації, логічно-апріорний аналіз можна ефективно застосовувати для вирішення не надто складних гідрологічних завдань: в регіональних дослідженнях, для аналізу даних спостережень за режимом підземних вод, при проектуванні підземних водозаборів, розчленуванні гідрографів річок, виборі розрахункових параметрів для моделювання тощо. У наш час цей метод експертного аналізу витісняється методами обробки даних за допомогою штучного інтелекту, що не вимагає глибоких знань предмету та значного досвіду дослідника. Показано, що логічно-апріорний аналіз може бути ефективним допоміжним методом при виконанні гідродинамічних розрахунків. Так, з його допомогою з'ясовано, що найрепрезентативнішим параметром, який проявляє і контролює залежність величини живлення ґрунтових вод від опадів є середньозважений річний коефіцієнт інфільтраційного живлення. Цей показник можна використовувати і для корегування невідомих фільтраційних параметрів, оскільки він має вузький діапазон варіабельності, що в свою чергу контролюється фактичною сумою річних опадів та його відомими середніми багаторічними зональними величинами.

Ключові слова: логічно-апріорний аналіз, приплив ґрунтових вод, гідродинамічні розрахунки, інфільтраційне живлення, коефіцієнт інфільтрації, рівень ґрунтових вод, баланс, режим.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку прикладних галузей науки, в т.ч. гідрології, на тлі широкого доступу до інформаційних джерел, відчувається брак державного фінансування польових та лабораторних досліджень, що змушує науковців та практиків звертатись до вже існуючих джерел, архівних матеріалів та використовувати власний досвід досліджень. Вагомого значення набуває вміння застосовувати та інтерпретувати дані попередніх геологічних досліджень для отримання необхідних показників геологічного середовища, виділення справжніх об'єктів-аналогів; інтерполяції та екстраполяції просторових даних для визначення невідомих проміжних та поза межних значень, адекватного оцінювання поточного стану за браком фактичної інформації. Врешті це дозволяє робити адекватні висновки та приймати вірні рішення.

Очевидно, що точність результатів режимних гідрологічних спостережень та їх інтерпретації визначається періодичністю і ретельністю вимірювань. Відсутність автоматизованої, регулярної системи спостережень з використанням датчиків-

рівнемірів ставить у залежність точність вимірювань від суб'єктивного чинника, збільшуючи кумулятивну помилку на етапах обробки та застосування даних у гідродинамічних розрахунках та моделях. Проте, той самий елемент суб'єктивізму втілений у експертне оцінювання може стати ефективним інструментом під час аналізу та інтерпретації існуючої інформації, перенесення її на інші, подібні об'єкти.

Одним із методів експертного оцінювання є логічно-апріорний аналіз, особливо незамінний при регіональних дослідженнях, районуванні, проектуванні водозаборів, розчленуванні гідрографів річок, виборі ділянок розташування спостережних свердловин, обробці даних режимних спостережень, бальній оцінці певних чинників або загального стану середовища тощо. Достовірність висновків або результатів такого аналізу залежить від повноти інформації, наявності об'єктів-аналогів, знань та досвіду дослідника (експерта).

Мета роботи. Доведення актуальності та ефективності застосування логічно-апріорного аналізу, як допоміжного методу, за умов браку даних або їх значної невизначеності.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Принципи та області застосування методу.

Отже, логічно-апріорний аналіз об'єднує вміння використовувати власний **досвід, методи аналогій та вірогіднісно-статистичний**. За підходами та ступенем достовірності висновків його можна поділити на *об'єктивний, суб'єктивний та інтуїтивний*. Сучасна популярність програмних засобів штучного інтелекту підштовхує до думки, що логічно-апріорний аналіз наразі повинен еволюціонувати у програмування за допомогою нейронних мереж. Так само, як і логічно-апріорний аналіз ці обчислювальні системи застосовуються для передбачення змінних у часі величин за відсутності алгоритму або принципів вирішення задач, невідомої структури моделі, неповноти та суперечливості даних але за наявності достатнього числа прикладів [17]. Тобто алгоритми логічно-апріорного аналізу та моделювання за допомогою штучного інтелекту доволі схожі, являючи собою послідовність наступних процедур: *“класифікування або типізація, тобто оцінка поточного стану об'єкту виходячи з наявної інформації про нього (або інструментального забезпечення досліджень)”* → *“ретроспективний аналіз — перегляд історії даного об'єкту та/або вибір схожої ситуації чи подібного об'єкту із досвіду дослідника”* → *“метод аналогій та актуалізму — співставлення об'єктів-аналогів та перенесення на досліджуваній об'єкт певних характеристик від аналога, або актуалізація події за аналогією із подією, що трапилась із схожим об'єктом”* → *“передбачення або прогнозування (при застосуванні логічно-апріорного аналізу виконується здебільшого на якісному рівні)”*. Звісно, логічно-апріорний аналіз може обмежуватись меншою кількістю ланок або виконуватись за іншими підходами, наприклад за принципом інтерполяції або екстраполяції тощо. Для навчання та адекватного рішення нейронним мережам необхідний великий обсяг вхідної інформації, яку людина не здатна досягнути одночасно. Проте дослідник замінює швидку обробку цього масиву даних попереднім досвідом та використовує власну інтуїцію замість машинної операційної системи. Отже машинний аналіз може претендувати на об'єктивний, а для науковців з досвідом лишається суб'єктивний та інтуїтивний види аналізу.

Використання штучних нейронних мереж в гідрогеології у найближчій перспективі слід спрямовувати не лише на обробку чисел а й на розпізнавання та екстраполяцію геологічних тіл (образів), передбачення фільтраційних параметрів, складу порід, якості та температури підземних вод тощо на малодоступних глибинах. Наразі ці питання час-

то вирішуються за допомогою логічно-апріорного аналізу, що не завжди виправдано.

Чи не вперше метод логічно-апріорного аналізу був описаний при його застосуванні для аналізу даних спостережень за режимом підземних вод [4]. Цей вид аналізу був застосований для вибору режимоформуючих чинників на етапі аналізу природних умов формування режиму ґрунтових вод (перший етап на шляху прогнозування рівня (РГВ) вірогіднісно-статистичними методами). Застосовуючи цей метод обирають чинники, які апріорно найбільш істотно впливають на шукану функцію (показник) і щонайменше залежать від інших чинників. Для рівня ґрунтових вод в першу чергу це — кількість опадів, температура приземного шару повітря, а по друге — співвідношення з рівнем напірних вод або рівнем води у річці (за певних місцевих умов та типу режиму ґрунтових вод). Також він може бути застосований при віднесенні осередку ґрунтових вод чи водоносного горизонту до того чи іншого типу режиму за зовнішніми (ландшафтними) ознаками; при виборі невідомих параметрів за відомими (наприклад: підбір коефіцієнта гравітаційної водовіддачі за відомим описанням породи, коефіцієнтом фільтрації, гранулометричним складом; підбір параметрів моделі “обліку вологості ґрунту” за фізичними властивостями ґрунту [18], вибір параметрів для інших моделей [12–16, 19] тощо).

Під час *регіональних досліджень*, користуючись знаннями про поширення водоносних горизонтів, їх хімічний склад, витриманість гідрогеологічного розрізу, кутів падіння та азимутів простягання порід на певній території, логічно припускати витриманість гідрохімічної зональності на невивчених ділянках. Поширення осадових або масивних кристалічних порід зумовлює накопичення або пластових, або тріщинно-жильних вод. Отже логічно-апріорний аналіз є корисним і під час побудови розрізів та при виділенні таксономічних одиниць *гідрогеологічного районування* [2, 7]. Можна застосувати його і при регіональних балансових розрахунках чисельним методом, та при визначенні перспективних і прогнозних ресурсів, проте у цих випадках традиційно прийнято використовувати методи інтерполяції, типізації та схематизації.

При *проектуванні* експлуатаційних свердловин цей метод близький до *методу аналогій*. Оскільки до проведення бурових робіт геологічний розріз та сталі рівні у водоносних горизонтах невідомі, при виборі конструкції свердловини доводиться спиратись на існуючу інформацію про найближчі каптажні споруди, на регіональні закономірності падіння пластів, змін їх потужності, фільтраційних параметрів, рівнів підземних вод. За наявності кіль-

кох свердловин із дещо різними і суперечливими розрізами слід уникати застосування принципів нейтральності та інваріантності, статистичного усереднення даних по цих свердловинах, а виходити з аналізу ландшафту, абсолютних відміток поверхні, наявності природних та штучних дрен тощо. За допомогою логічно-апріорного аналізу можна також підібрати прогнозне експлуатаційне зниження у недосконалій свердловині.

Під час вибору точок розташування спостережних свердловин для проведення багатосвердловинних експериментів із визначення швидкості фільтрації та коефіцієнтів дисперсії за допомогою консервативних індикаторів, доводиться застосовувати *апріорні уявлення* про головний напрямок підземного потоку. Це передбачає проведення рекогносцировки або визначення областей живлення та розвантаження за спеціалізованими картами.

При розчленуванні гідрографів ми спираємось на відомі закони гідродинаміки, місцеві та зональні чинники, характер розкриття річкою водоносних горизонтів та тип взаємодії підземних вод з річковими, враховуємо вплив техногенних споруд, осушення або зрошення площі водозбору. Наприклад, якщо *апріорі* відомо, що з весняними піками і окремими сезонними сплесками витрат у річці пов'язані періоди відсутності або різкого зменшення припливу ґрунтових вод, і максимум річкового стоку відповідає мінімуму підземного, то логічним буде висновок, що інтенсивність зменшення витрат підземного стоку дорівнюватиме інтенсивності зростання поверхневого стоку з моменту різкого перегину гідрографа у фазі його загального сезонного підйому, і навпаки, інтенсивність нарощування обсягу підземного стоку буде близькою до інтенсивності зниження витрат поверхневого стоку до

точки зміни напряму графіка у бік вирівнювання стоку [3].

Під час *моніторингових досліджень* цей вид аналізу передбачає використання знань про зональні гідрометеорологічні, регіональні геофізичні, геодинамічні, ландшафтні та інші режимоформуючі чинники, закони фільтрації та вологоперенесення для пояснення невідповідностей у коливаннях рівнів ґрунтових вод, нев'язках їх річного балансу тощо.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Автором використано логічно-апріорний аналіз для пояснення, екстраполяції і коригування складових балансу ґрунтових вод, отриманих за результатами несистематичних спостережень на осушувальній системі "Прип'ятська" в Чорнобильській зоні відчуження. З результатів буріння відомо, що потужність водотриву між першим від поверхні безнапірним водоносним горизонтом і другим, міжпластовим напірним горизонтом, складає близько 18 м. Тому кількісною оцінкою перетікання через водотривкий шар можна знехтувати, оскільки *апріорі* інтенсивність латерального водообміну на прилеглих до каналів площах осушувальних систем набагато вища, ніж вертикального. Проте, для вододілів існує висока ймовірність втрат ґрунтових вод на низхідне перетікання, а для схилів низьких терас і прирічкових ділянок — їх поповнення внаслідок висхідного перетікання з напірного горизонту. Значне перевищення відтоку ґрунтових вод у бік каналу над їх припливом з водозбору до балансової ділянки обумовлюється тим, що градієнт напору між свердловинами №№ 6 і 5, розташованими, відповідно, на вододілі та на пологому схилі, на відстані 260 м одна від одної (рис. 1), на порядок менший,

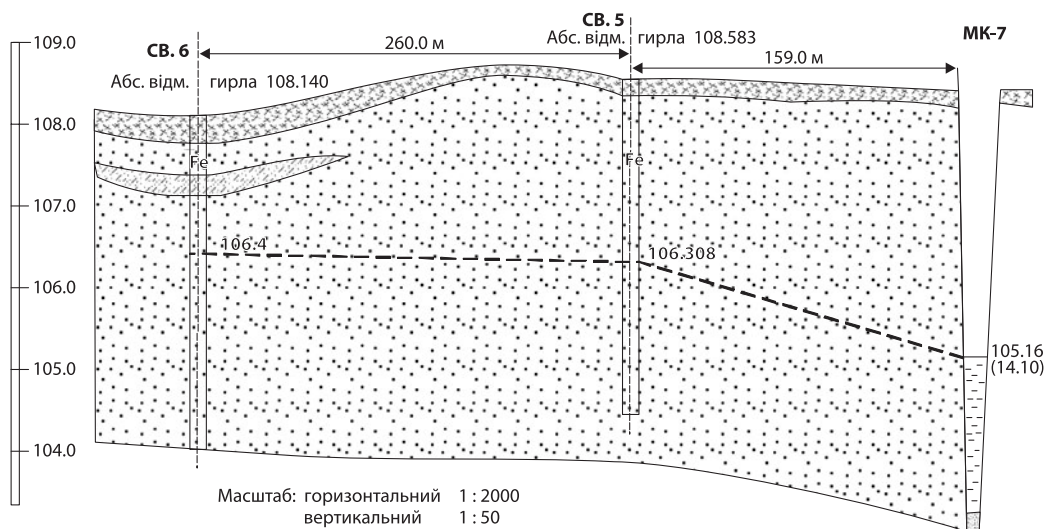


Рис. 1. Розріз по гідрогеологічному створу: "свердловина № 6 — рейка в каналі МК-7", с. Красне

ніж на ділянці між свердловиною № 5 і каналом. Отже, баланс ґрунтових вод формується шляхом їх постійного поповнення, в першу чергу за рахунок інфільтрації, по друге — бічного припливу з водозбору; витрати ж складаються з випаровування та бічного відтоку [8].

Завдяки достатній потужності та регулюючому впливу зони аерації, в даному випадку не спостерігається строгої залежності РГВ від суми атмосферних опадів за період між датами замірів рівня (рис. 2). Тим не менш, на подібних ділянках складених піщаними відкладами спостерігається достатньо тісна залежність максимальних весняних рівнів від суми зимових опадів: коефіцієнт кореляції між цими показниками становить 0,7. Гранулометричний склад та потужність зони аерації в 1,15–2,5 м, а також лісова рослинність, що затримує снігові опади, сприяють живленню ґрунтових вод у безморозний зимово-весняний період. Значне розвантаження до відкритої дрени є першочерговим чинником, що обумовлює мінімальні зимові та літні РГВ. Інтенсивність розвантаження в літній період найбільша, а весною, внаслідок підпору від каналу (березень-травень) — найменша. Випаровування за таких РГВ відіграє другорядну роль. Уповільнення стоку ґрунтових вод весною сприяє підйому РГВ [10]. За вільної фільтрації, без підпору, різниця між РГВ на водозборі та рівнем води у каналі становить 1,0–1,3 м (див. рис. 1). Рівні ґрунтових та поверхневих вод коливаються синхронно, що підкреслює їх взаємо-

залежність і, одночасно, їх спільну залежність від метеорологічних чинників [10].

Аналізуючи чинники зростання концентрації ^{90}Sr в ґрунтових водах (рис. 3) можна дійти висновку, що за товщини зони аерації піщаного складу в середньому 2–3 м інфільтраційне живлення ґрунтових вод відбувається лише за місячної суми дощових опадів не менше 40 мм.

Річні амплітуди коливань РГВ сягають 0,61–1,25 м (табл. 1). Збільшення амплітуди спостерігається із віддаленням від каналу, — на залісненій ділянці водозбору (рис. 1, св. № 6) вона більша на 3–12 см, ніж на ділянці транзиту до каналу (св. № 5), що під лугом.

При співставленні кількості опадів та значень живлення ґрунтових вод (Δw), помітні періоди, коли живлення було більшим за опади, що пояснюється участю в живленні ґрунтових вод опадів попереднього періоду, або бічного припливу і/або

Таблиця 1. Амплітуди коливань рівнів ґрунтових вод на ділянці транзиту (свердловина 5) та на пласкій, залісненій частині водозбору (свердловина 6) [11]

№ свердловини	Рік спостережень			
	1998	1999	2001	2002
5	0,61	1,25	0,78	0,67
6	0,64	1,23	0,87	0,79

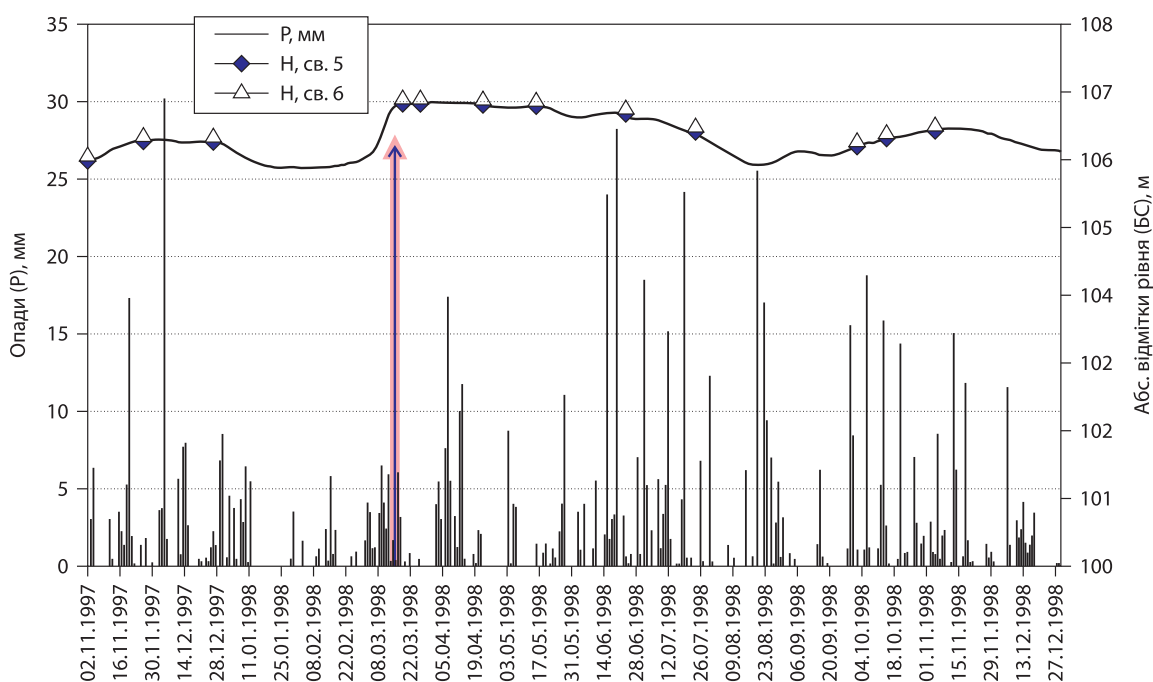


Рис. 2. Інтерпретація нерегулярних замірів РГВ за допомогою логічно-апріорного аналізу даних випадіння атмосферних опадів та температури ґрунту (див. рис. 3). Лінія зі стрілкою — початок стійких плюсових температур

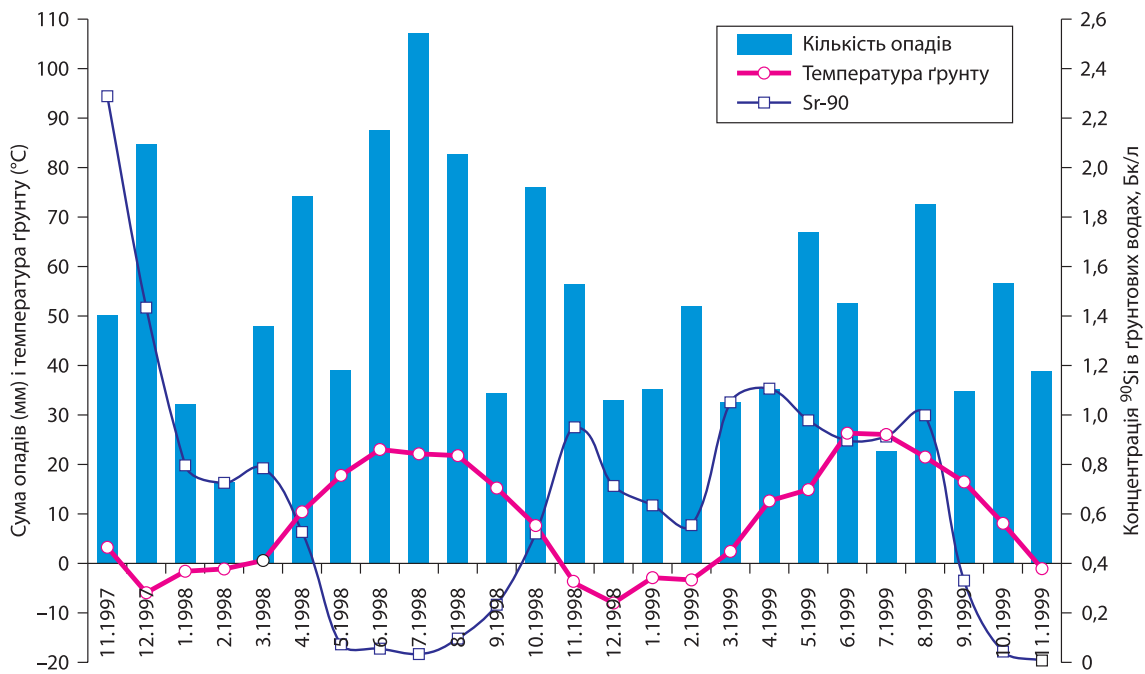


Рис. 3. Коливання температури ґрунту, об'ємної активності ґрунтових вод за ⁹⁰Sr на фоні змін місячної суми атмосферних опадів

напірного живлення [11]. Звичайно останнє проявлятиметься в періоди літньо-осінньої межени, коли РГВ знижуються, а рівень напірних вод лишається сталим.

Затримка інфільтраційного живлення позначається на значних відхиленнях коефіцієнта інфільтрації (K_w) від середніх багаторічних значень. Коефіцієнт інфільтрації виражає частку надходження атмосферних опадів на рівень ґрунтових вод (рівняння (1)). Навесні, коли до живлення долучаються талі води від снігозапасів зимового періоду, коефіцієнт інфільтрації може звичайно перевищувати одиницю. Так, за період 26.12.97–15.03.98 рр. розрахункове живлення склало 140,38 мм (табл. 2) і K_w сягнув 1,36. Це може свідчити лише про те, що в інфільтраційному живленні ґрунтових вод на початку 1998 р. приймали участь грудневі опади 1997 р. Дещо зависоким виявився і K_w за осінньо-весняний період 1997–1998 рр. (2.11–15.03) — 0,85, що можна пояснити запізненням надходження частини опадів вересня та жовтня на РГВ. В той же час K_w за літні сезони надто низькі (у 1998 р. — 0,18), що свідчить про переважання випаровування і транспірації над інфільтрацією опадів.

$$K_w = \Delta w / P, \quad (1)$$

де Δw — інфільтраційне живлення; P — сума опадів за відповідний період.

Вочевидь, за неглибокого залягання ґрунтових вод (0,7–1,4 м) зимові опади надходять на РГВ переважно у березні. Проте, якщо враховувати, що випа-

рування відбувається і в холодний період, надлишок живлення (табл. 2), в т.ч. на його компенсацію, наприклад за час з 26.12.97 р. по 15.03.98 р. можна віднести на бічний приплив. Ці логічні міркування підкріплюються розрахунками відстані до найвищої точки вододілу при вирішенні зворотної задачі за рівнянням (2). Від свердловини № 6 ця відстань складає близько 140 м. Оскільки область живлення поширюється вгору від свердловини № 6 на деяку відстань, вірно допускати наявність невеликого бічного припливу з верхньої частини водозбору, а в багатоводні періоди — із сусідньої підтопленої осушувальної системи [10,11].

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

де k_ϕ — середній коефіцієнт фільтрації відкладів, що складають горизонт ґрунтових вод, м/добу; h — середня для балансового майданчика потужність цього водоносного горизонту, м; H_1, H_2 — середні за Δt РГВ у свердловинах № 6 і № 5, м; ℓ — відстань між пунктами спостережень, м; L — відстань від верхньої за потоком свердловини № 6 до лінії підземного вододілу (за відмітками поверхні), м; 10^3 — коефіцієнт переходу до мм шару води.

Таким чином, якщо часові інтервали між вимірами РГВ досить великі, отримувані значення елементів живлення можуть виявитись завищеними, що вимагає їх коригування за допомогою інших оцінок і підходів, у тому числі — з використанням логічно-апріорного аналізу.

Таблиця 2. Результати розрахунку балансу ґрунтових вод за даними спостережень в свердловинах № 5 і № 6 і на водомірному посту Р-3 на каналі-водоприймачі МК-7

Дата	Інтервал часу Δt , доба	Рівні води по пунктах вимірювань, м			Поповнення ґрунтових вод, мм	Різниця між бічним припливом та відтоком ґрунтових вод з балансової ділянки, мм	Зміна запасу ґрунтових вод (баланс), мм
		св. 6	св. 5	Рейка-3 в каналі МК-7			
02.11.1997		106,06	105,94	104,74			
26.11	24	106,34	106,25	104,95	56,61	-24,61	32,00
26.12	30	106,33	106,23	105,09	34,54	-30,14	4,40
15.03.1998	79	106,91	106,78	105,66	140,38	-72,38	68,00
26.03	11	106,90	106,77	105,64	8,34	-9,94	-1,60
22.04	27	106,91	106,778	105,675	26,31	-24,19	2,12
15.05	23	106,87	106,77	105,63	17,17	-20,89	-3,72
23.06	39	106,75	106,64	105,415	19,11	-37,71	-18,60
23.07	30	106,50	106,36	105,45	-1,8	-29,48	-31,28
01.10	70	106,27	106,17	105,03	44,33	-66,25	-21,92
14.10	13	106,40	106,31	105,16	27,99	-12,19	15,80
04.11.1998	20	106,51	106,39	105,20	28,32	-19,12	9,20
Всього	366				401,3	-346,9	54,40
24.03.1999	140	106,99	106,94	105,66	202,80	-143,20	59,60
15.05	52	107,19	107,113	105,77	76,54	-57,22	19,32
12.08	89	106,26	106,15	105,01	-14,99	-91,13	-106,12
07.10	56	105,975	105,863	104,725	17,58	-51,86	-34,28
11.11.1999	35	105,985	105,873	104,735	33,56	-32,36	1,20
Всього	372				330,5	-375,77	-60,28
$k_{\phi} = 4,8$ м/добу		$\mu = 0,12$		$h_{\text{сер.}} = 6$ м	$\ell_1 = 260$ м	$\ell_2 = 159$ м	

За співвідношенням опадів та інфільтраційного живлення за холодний період різниця шару опадів та інфільтрації в період 26.11–26.12. 1997 р. приблизно дорівнює їх різниці за наступний період проте вже з додатнім балансом для ґрунтових вод (+36,88 мм). Тобто, логічно припустити, що частина опадів грудня, за незначного випаровування в зимовий період, затрималась у зоні аерації та пішла на інфільтраційне живлення у наступний період, що забезпечило підйом РГВ [11]. Якщо закласти на зимовий період місячну норму випаровування і врахувати величину поверхневого стоку, можна отримати менше, вірогідно точніше значення інфільтраційного живлення та бокового припливу: за інтервал часу 26.12.97–15.03.98 рр. живлення завдяки інфільтрації склало 98,57 мм, а бічний приплив з вище розташованої частини водозбору — 41,81 мм, що в сумі відповідає розрахунковому значенню за цей інтервал часу (див. табл. 2).

Таким чином, шляхом застосування логічно-апріорного аналізу було знайдено більш обґрунтоване значення інфільтраційного живлення за 366 днів 1997–1998 рр. — 321,3 мм [11], а величина 81,8 мм, що близька до його різниці з попереднім

значенням (див. табл. 2), отриманим за чисельними розрахунками, віднесена до бокового припливу (табл. 3). За такого розподілу значення середнього коефіцієнту інфільтраційного живлення за рік склало 0,45, що кореспондується із відомими зональними величинами.

Реакція РГВ на атмосферні опади відбувається із певним запізненням (особливо в зимовий період), а отже підйом РГВ у весняний період зумовлюється сумою опадів останнього морозного періоду, акумульованої в зоні аерації вологи та ходом температури. Звідси, було б некоректно визначати коефіцієнт інфільтраційного живлення (K_w) за короткий інтервал часу між вимірами РГВ (не зрозуміло з якою величиною опадів співвідносити шар інфільтрації). Для осіннього періоду K_w видається зависоким (табл. 3), проте він може відповідати дійсності, оскільки випаровування істотно зменшується порівняно з літнім сезоном. Так, на осінньо-зимовий період 1997 р. (2.11–26.12) K_w склав 0,7; за інтервал часу 26.12–15.03 1997–1998 рр. — 0,85, а за холодний період 1998–1999 рр. (14.10–24.03) — 0,77.

Якщо долучити до теплого періоду 23.06–1.10 1998 р. ще весняний інтервал 22.04–15.05, то кое-

фіцієнт інфільтрації зміниться несуттєво і складе близько 0,22.

Отже значеннями K_w на рівні 0,2–0,25 можна характеризувати інфільтраційне живлення теплого періоду, а порядку 0,70–0,85 — холодного. Річні значення K_w в зоні Полісся, розраховані за період спостережень за РГВ 1997–2002 рр., за відповідних РГВ (близько 1,0 м) та складу ґрунтів зони аерації, складають близько 0,4–0,5 (табл. 3). Найнижче річне значення (за 2000 р.) дорівнювало 0,31, всі інші вкладались в означений діапазон [11]. Очевидно, що коефіцієнти інфільтрації холодного та теплого періодів істотно відрізняються і для управління водними ресурсами та оцінок впливу змін клімату на ресурси ґрунтових вод варто розглядати ці показники окремо (з побудовою відповідних карт).

Отже, найбільш показовим параметром, який характеризує певний тип гідродинамічних умов є середньозважений, порашований окремо за *теплий та холодний періоди року, а також підсумковий за рік коефіцієнт інфільтраційного живлення*. На відміну від абсолютного значення інфільтрації він змінюється в досить вузьких межах (табл. 3).

Викладені результати добре співвідносяться з оцінками інфільтраційного живлення, які були незалежно виконані іншими дослідниками в ЧЗВ. Так, величина інфільтраційного живлення, визначена В.Ю. Саприкіним за коефіцієнтом вологоперенесення гідрофізичним методом А.Б. Ситнікова [6] (за допомогою датчиків вологості та тензіометрів, встановлених в зоні аерації) для балансової ділянки “Рудий ліс” (поблизу ЧАЕС) склала за 2001 р. 265 мм (40% від суми опадів 668 мм) [5]. За нашими оцінками на балансовому майданчику на лівобережжі р. Прип’ять з практично ідентичними (можливо більш дрібнозернистими) піщаними ґрунтами в зоні аерації — 245 мм [8, 11]. Крім того, для полігону “Рудий ліс” було визначено сумарну інфільтрацію шляхом аналізу “гідрографа спостережної свердловини за допомогою графоаналітичного методу Н. Біндемана”: за 2001 р. вона становила 232–266 мм [1].

Щоб остаточно відкоригувати співвідношення інфільтраційного живлення та бічного припливу визначається *інтенсивність інфільтрації* (ω , мм/добу). Для цього є відповідний метод, що забезпечується даними режимних спостережень по трьох свердло-

Таблиця 3. **Результати розрахунку інфільтрації, бічного припливу, втрат вологи на випаровування і коефіцієнта інфільтраційного живлення [11]**

Дата	Період між вимірами, доби	Опади, мм	Інфільтраційне живлення (Δw), мм	Бічний і можливо напірний приплив, мм	Поверхневий стік при $K_{п.ст.} = 0,01-0,04$, мм	Випаровування з ґрунту (E) та ґрунтових вод (e), мм	Коефіцієнт інфільтраційного живлення (K_w)
1	2	3	4	5	6	7	8
2–26.11.97	24	49	51,11	5,5	-1,23	-15,0	
26.12.97	30	68,3	31,54	3,0	-1,73	-13,73	0,70
15.03.98	79	103,5	98,57	41,8	-7,85	-23	0,85
26.03.98	11	11,2	6,34	2,0	-2,06	-1,15	
22.04.98	27	0,0	0,31	25,0	—	-3,5	
15.05.98	23	92	17,17	1,0	-1,16	-72,1	0,27
23.06.98	39	208,5	19,11	—	-2,5	-120,7	
23.07.98	30	0,0	0,0	—	—	-34,2 (-1,80)	
1.10.98	70	137	44,33	—	-5,5	-86,8	0,18
14.10.98	13	21	24,5	3,5	-0,21	-1,0	
4.11.98	20	36	28,32	—	-0,46	-7,32	
Всього	366	726,5	321,3	81,8	-22,7	-378,5	0,44 (0,55*)
24.03.99	140	205,6	158,8	49,19	-8,41	-37,8	
15.05.99	52	46,8	8,2	63,14	-0,96	-42,0	
12.08.99	89	155,10	5,2	—	-3,8	-146 (-15,0)	
7.10.99	56	94,3	17,6	—	-2,5	-68,6	
11.11.99	35	56,5	33,56	—	-1,93	-22,94	
Всього	372	558,3	223,36	112,33	-17,6	-317,34	0,40 (0,59*)

Примітка: Значення в дужках колонки 7 — в т.ч. розрахункове випаровування з рівня ґрунтових вод; * — в дужках колонки 8 — коефіцієнт сумарного (інфільтраційного, бічного та, можливо, напірного) живлення.

винах, розташованих за напрямком фільтраційного потоку. Розглядається лише інтервал (інтервали) часу, коли підйом РГВ був рівномірним а інфільтрація постійною. За відсутності третьої свердловини, можна "встановити" віртуальну — в проміжку між існуючими. Так, в даному випадку, між свердловинами №№ 5 і 6 прийнято умовну свердловину за припущення, що в цьому просторовому діапазоні градієнт напору за потоком зберігає свою сталість. Було підтверджено, що градієнт витримувався впродовж всього періоду спостережень на рівні 0,01. Згідно розрахунків за формулу (3), інфільтраційне живлення за майже 6,5 місяців 1998–1999 рр. склало 167 мм.

$$\omega = \mu \frac{H_i^{t+1} + H_i^{t-1}}{\Delta t} - \frac{T}{\Delta \ell^2} (H_{i-1}^t - 2H_i^t + H_{i+1}^t), \quad (3)$$

де H_i^{t-1} , H_i^t , H_i^{t+1} — абсолютні відмітки рівня ґрунтових вод в центральній свердловині відповідно на початковий, середній і кінцевий періоди спостережень; H_{i-1}^t , H_{i+1}^t — абсолютні відмітки РГВ в свердловинах, розташованих відносно центральної, відповідно нижче і вище за потоком в середній період спостережень; Δt — період спостережень; $\Delta \ell$ — відстань між спостережними свердловинами [11].

Сумарне живлення, визначене гідродинамічним методом для області з двох свердловин і рейки в каналі, дорівнює 279,34 мм [11]. Різницю між даними значеннями (112,33 мм) можна віднести до бічного припливу на балансову ділянку з верхньої частини водозбору.

Очевидно, що надходження радіонуклідів в ґрунтові води значною мірою залежить (без врахування фізико-хімічних форм радіонуклідів в ґрунтах) від кількості опадів, рослинного покриву, температурного режиму, потужності зони аерації, її літологічного та гранулометричного складу, фільтраційних властивостей тощо. Проте, слід застерегти, що застосування логічно-апріорного аналізу для усіх випадків наближеного визначення забруднен-

ня ґрунтових вод за домінуючими чинниками (або джерелами) неприпустиме, оскільки в ряді випадків інфільтраційне живлення виступає у ролі чинника розбавлення та дисипації, тобто прискорює самоочищення водоносного горизонту, натомість в інших випадках (здебільшого за вододільного режиму ґрунтових вод) — забезпечує основний механізм перенесення радіонуклідів до РГВ, що продемонстровано у роботі [8].

ВИСНОВКИ

За браку сучасної вхідної інформації (гідрогеологічної, гідрологічної тощо) логічно-апріорний аналіз може ефективно застосовуватись як допоміжний метод для вирішення не надто складних гідрогеологічних завдань: в регіональних дослідженнях, для аналізу даних спостережень за режимом підземних вод, при проектуванні підземних водозборів, розчленуванні гідрографів річок, виборі розрахункових параметрів для моделювання тощо. При його застосуванні слід виходити з відомих гідродинамічних законів та закономірностей, що розкривають залежність гідрогеологічних показників та параметрів від умов середовища та динамічних чинників. Логічно-апріорний аналіз залишається актуальним, ефективним та незамінним в гідрогеології, оскільки в цій галузі наук про Землю майже вся інформація прихована під денною поверхнею, що вимагає широкого діапазону знань, досвіду та інтуїції дослідника. В той же час цього не потребує використання штучних нейронних мереж, які самі навчаються, працюючи з великими масивами даних.

За результатами виконаних гідродинамічних розрахунків та логічно-апріорного аналізу встановлено, що найбільш показовим параметром, який характеризує певний тип гідродинамічних умов та залежність живлення ґрунтових вод від опадів є середньозважений річний коефіцієнт інфільтраційного живлення.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Бугай Д.О. та ін. Дослідження міграції радіонуклідів на експериментальній ділянці-полігоні в ПТЛРВ "Рудий ліс". Ч. 2: Міграція радіонуклідів в геологічному середовищі. *Чорнобильський наук. вісник*. 2007. **2 (30)**. 16–33.
[Bugai, D.O. et al. (2007). Study of the migration of radionuclides at the experimental site-polygon in the Rudy lis PTLRV. Part 2: Migration of radionuclides in the geological environment. *Chernobyl of science Bulletin*. **2 (30)**. 16–33].
2. Камзіст Ж.С., Шевченко О.Л. Гідрогеологія України: навч. посіб. Київ: Фірма "ІНКОС", 2009. 614 с.
[Kamzist, J.S., Shevchenko, O.L. (2009). *Hydrogeology of Ukraine*. Kyiv. 614].
3. Ковалевский В.С. Условия формирования и прогнозы естественного режима подземных вод. Москва: Недра, 1973. 152 с.
[Kovalevsky, V.S. (1973). *Conditions of formation and forecasts of the natural regime of groundwater*. Moscow: Nedra. 152].
4. Коноплянцев А.А. Вопросы изучения и прогноза режима подземных вод. Москва, 1970. **Темат. вып. 25**. 34–58.
[Konoplyantsev, A.A. (1970). *Issues of studying and forecasting the regime of groundwater*. Moscow. **Them. issue 25**. 34–58].
5. Саприкін В.Ю., Бугай Д.О., Скальський О.С., Джепо С.П., Ван Меер Н., Кубко Ю.І., Сімонуччі К. Режим інфільтраційного живлення ґрунтових вод на ділянці чорнобильського "Рудого лісу". *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2011. **4**. 141–151.
[Saprykin, V.Yu., Bugai, D.O., Skalskyi, O.S., Dzepo, S.P., Van Meer, N., Kubko, Y.I., Simonucci, K. (2011). *Regime of infiltration of groundwater in the area of the Chernobyl "Red*

- Forest". *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine*. **4**. 141–151].
6. Ситников А.Б., Головченко Ю.Г., Ткаченко К.Д. Гидрогеологическая станция "Феофания": многолетние исследования и результаты. НАН Украины. Ин-т геол. наук. К., 2003. 200 с.
[Sitnikov, A.B., Golovchenko, Yu.G., Tkachenko, K.D. (2003). Hydrogeological station "Feofania": long-term research and results. NAS of Ukraine. Institute of Geol. Sci. Kyiv. 200].
 7. Шевченко О.Л. Уніфікація принципів та одиниць гідрогеологічного районування України. *Збірник наукових праць Українського державного геологорозвідального інституту*. 2008. **2**. 37–45.
[Shevchenko, O.L. (2008). Unification of principles and units of hydrogeological zoning of Ukraine. *Collection of scientific works of the Ukrainian State Geological Survey Institute*. **2**. 37–45].
 8. Шевченко О.Л., Козицький О.М., Наседкін І.Ю., Рябцева Г.П., Бублясь В.М. та ін. Закономірності міграції техногенних радіонуклідів на меліоративних системах Чорнобильської зони відчуження (за результатами досліджень 1986–2004 рр.). Херсон: Олді-плюс, 2011. 415 с.
[Shevchenko, O.L., Kozutskyi, O.M., Nasedkin, I.Yu., Ryabtseva, G.P., Bublyas, V.M., Ivanushkina, N.I., Osadcha, N.M., Syzonenko, V.P. (2011). Patterns of migration of man-made radionuclides on reclamation systems of the Chernobyl Exclusion Zone (based on research results from 1986–2004) / ed. in chief V.A. Stashuk. Kherson: Ukraine. 415].
 9. Шевченко О.Л., Наседкін І.Ю. Водно-радіаційно-балансові дослідження для обґрунтування водоохоронних заходів у Чорнобильській зоні відчуження. *Меліорація і водне господарство*. **89**. 2003. 157–170.
[Shevchenko, O.L., Nasedkin, I.Yu. (2003). Water-radiation-balance studies for the justification of water protection measures in the Chernobyl Exclusion Zone. *Reclamation and water management*. **89**. 157–170].
 10. Шевченко А.Л., Наседкін І.Ю. Естественные антропогенные особенности формирования водообмена и распространения радиоактивных веществ на мелиоративных системах гумидной зоны // Водобмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Ч. 1. Киев, НАН Украины, 2001. 162–232.
[Shevchenko, A.L., Nasedkin, I.Yu. (2001). Natural-anthropogenic features of the formation of water exchange and the spread of radioactive substances in reclamation systems of the humid zone // *Water exchange in hydrogeological structures and the Chernobyl disaster*. Part 1. Kyiv, NAS of Ukraine, 162–232].
 11. Шевченко О.Л. Радіогідрогеологія осушуваних ландшафтів Українського Полісся (на прикладі Чорнобильської зони відчуження): дисертація на здобуття наук. ступеня доктора геол. наук: спец. 04.00.06 "Гідрогеологія". Київ: Інститут геол. наук НАН України, 2016. 382 с.
[Shevchenko, O.L. (2016). Radiohydrogeology of drainage landscapes of the Ukrainian Polissia (on the example of the Chernobyl exclusion zone). dissertation for obtaining sciences degree of Doctor of Geol. Sciences: specialty 04.00.06 "Hydrogeology". Kyiv: Institute of Geol. of Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine. 382 p.].
 12. Chouaib, W., Alila, Y., Caldwell, P.V. (2021). Implications of a Priori Parameters on Calibration in Conditions of Varying Terrain Characteristics: Case Study of the SAC-SMA Model in Eastern United States. *Hydrology*. **8** (2). 78. <https://doi.org/10.3390/hydrology8020078>.
 13. Duan, Q., Schaake, J., Koren, V.I. (2001). A Priori estimation of land surface model parameters. *Water Science and Application*; American Geophysical Union: Washington, DC, USA. **3**. 77–94.
 14. Hrachowitz, M., Savenije, H., Blöschl, G., McDonnell, J., Sivalapan, M., Pomeroy, J., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M., Ehret, U. et al. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB): A review. *Hydrol. Sci. J.* **58**. 1198–1255.
 15. Koren, V., Smith, M., Duan, Q. (2003). Use of a priori parameter estimates in the derivation of spatially consistent parameter sets of rainfall-runoff models. In *Calibration of Watershed Models*; American Geophysical Union: Washington, DC, USA. 239–254.
 16. Shevchenko, A. (2002). Distribution and Migration of Radionuclides in Meliorated Areas // Chernobyl disaster and groundwater / Editor V. Shestopalov. Publisher Lisse/Abingdon/Exton(pa) / Tokyo: A.A. Balkema. 133–186.
 17. Tiwari Mukesh, K., Adamowski, J. (2013). Urban water demand forecasting and uncertainty assessment using ensemble wavelet-Bootstrap-Neural network models. *Water resources research*. **49**. 6486–6507.
 18. Yao, C., Li, Z., Yu, Z., Zhang, K. (2012). A priori parameter estimates for a distributed, grid based Xinanjiang model using geographically based information. *J. Hydrol.* **468–469**. 47–62.
 19. Yokoo, Y., Kazama, S., Sawamoto, M., Nishimura, H. (2001). Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression. *J. Hydrol.* **246**. 209–222.

Shevchenko Oleksii

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

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

LOGICAL-APRIORI ANALYSIS IN HYDROGEOLOGICAL RESEARCH

The article demonstrates with examples that due to the lack of input information, logical a priori analysis can be effectively applied to solve not too complex hydrogeological problems: in regional studies, for the analysis of observation data on the groundwater regime, in the design of underground water intakes, dissection of river hydrographs, selection calculation

parameters for modeling, etc. Nowadays, this method of analysis is replaced by methods of information processing using artificial intelligence, which does not require deep knowledge of the subject and significant experience of the researcher. It is shown that the logical a priori analysis can be an effective auxiliary method when performing hydrodynamic calculations. Thus, with its help, it was found that the most representative parameter, which manifests and controls the dependence of the groundwater recharge on precipitation, is the weighted average annual coefficient of infiltration recharge. This indicator can also be used to correct unknown filtering parameters, since it has a narrow range of variability, which in turn is controlled by the actual amount of annual precipitation.

Keywords: logical and a priori analysis, groundwater inflow, hydrodynamic calculations, infiltration recharge, infiltration coefficient, groundwater level, balance, regime.