УДК 556.3:539.1

Перспективи застосування методів ізотопної гідрології для оцінки ресурсів, умов формування та захищеності підземних вод України

***Дядін Д. В.**, ORCID ID 0000-0003-3421-3592, канд. техн. наук, dmytro.diadin@igim.org.ua,*
Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України, Київ, Україна

Розглянуто перспективи застосування методів ізотопної гідрології для оцінки стану, умов формування, відновлюваності та природної захищеності основних експлуатаційних водоносних горизонтів і комплексів України. Показано можливості використання стабільних ізотопів водню і кисню (δ^2H, δ^{18}O) для встановлення джерел і сезонності живлення, процесів змішування та гідравлічних зв'язків між поверхневими і підземними водами. Розглянуто застосування 3H/3He та хлорфторвуглеців (CFC) для оцінювання видимого віку молодих підземних вод, інтенсивності водообміну та частки сучасного живлення. Як перспективний об'єкт для таких досліджень наведено багатоповерхову систему водоносних горизонтів Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну. Окремо розглянуто можливості використання ізотопних даних для уточнення природної захищеності водоносних горизонтів та ідентифікації джерел нітратного забруднення. Обґрунтовано доцільність інтеграції ізотопних методів із гідрогеологічними, гідрохімічними та геоінформаційними дослідженнями при оцінюванні експлуатаційних ресурсів підземних вод.

Ключові слова: ізотопна гідрологія, підземні води, водоносний горизонт, δ^{18}O, δ^2H, ^{3}H/^{3}He, CFC, живлення підземних вод, відновлюваність ресурсів, природна захищеність

Prospects for applying isotope hydrology methods to assess groundwater resources, formation conditions and aquifer protection in Ukraine

***Diadin Dmytro**, ORCID ID 0000-0003-3421-3592, Cand. Sci. (Tech), dmytro.diadin@igim.org.ua*
Institute of Water Problems and Land Reclamation of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The prospects for applying isotope hydrology methods to assess the status, formation conditions, renewability and natural protection of the main exploited aquifers and aquifer systems of Ukraine are considered. The potential of stable hydrogen and oxygen isotopes (δ^2H and δ^{18}O) for identifying recharge sources and seasonality, mixing processes, and hydraulic connections between surface water and groundwater is discussed. The application of ^{3}H/^{3}He and chlorofluorocarbons (CFCs) for estimating the apparent age of young groundwater, groundwater exchange intensity and the contribution of modern recharge is considered. The multilayer aquifer system of the Dnipro-Donets artesian basin is presented as a particularly promising target for such investigations. The potential use of isotope data for refining assessments of aquifer natural protection and identifying sources of nitrate contamination is also addressed. Integration of isotope techniques with hydrogeological, hydrochemical and geospatial investigations is proposed as an effective approach for improving the assessment of exploitable groundwater resources and supporting more reliable conceptual models of groundwater flow systems.

Keywords: isotope hydrology, groundwater, aquifer, δ^{18}O, δ^2H, ^{3}H/^{3}He, CFC, groundwater recharge, resource renewability, aquifer protection.

Вступ. Підземні води є важливою складовою природно-ресурсного потенціалу надр України та відіграють суттєву роль у забезпеченні питного, господарського і промислового водопостачання. Раціональне використання ресурсів підземних вод потребує не лише кількісної оцінки запасів і моніторингу гідродинамічних та гідрохімічних показників, але й достовірного розуміння умов формування, джерел живлення, інтенсивності водообміну, ступеня відновлюваності та захищеності від антропогенного забруднення. Особливої актуальності ці питання набувають в умовах зростання техногенного навантаження, трансформації землекористування, зміни клімату та порушення водогосподарської інфраструктури внаслідок воєнних дій.

Традиційні гідрогеологічні й гідрохімічні методи дозволяють отримувати важливу інформацію про стан водоносних горизонтів, однак у багатьох випадках не дають змоги однозначно встановити походження води, визначити частку сучасного живлення, оцінити швидкість водообміну або простежити гідравлічні зв'язки між різними компонентами водної системи. Додаткові можливості для вирішення цих завдань надають методи ізотопної гідрології, які ґрунтуються на аналізі природного ізотопного складу води та розчинених у ній компонентів і широко застосовуються для дослідження живлення, шляхів руху, змішування та віку підземних вод [1, 2].

Використання стабільних ізотопів водню і кисню, тритію, ізотопів вуглецю, а також ізотопних характеристик окремих забруднювальних речовин дозволяє досліджувати походження і сезонність живлення підземних вод, розрізняти сучасні та давні води, встановлювати процеси змішування, оцінювати взаємодію поверхневих і підземних вод та визначати джерела забруднення. У поєднанні з традиційними гідрогеологічними, гідрохімічними та геоінформаційними методами ізотопні дослідження можуть суттєво підвищити обґрунтованість оцінки експлуатаційних ресурсів і природної захищеності водоносних горизонтів [2].

В Україні потенціал ізотопної гідрології для вирішення прикладних гідрогеологічних завдань поки реалізований лише частково. Аналіз наявних публікацій свідчить, що дослідження мають переважно локальний або регіональний характер і зосереджені на окремих компонентах водного циклу та водоносних системах. Зокрема, стабільні ізотопи δ^2H і δ18O використовувалися для формування ізотопної основи басейнових досліджень і встановлення сезонності живлення підземних вод у Східній Україні [3, 7], для аналізу чутливості гідрологічних процесів до зміни клімату [3], а також для дослідження просторово-часових закономірностей ізотопного складу опадів у північно-центральній частині України [1]. Комплексне трасування джерел живлення та забруднення неглибоких міських підземних вод було апробовано на прикладі Харкова [8, 9], тоді як для глибших експлуатаційних горизонтів Києва показано інформативність просторово-часового розподілу тритію для оцінки водообміну сеноман-келовейського комплексу [10].

Водночас ці дослідження ще не сформували систематичного застосування ізотопних методів під час оцінки експлуатаційних ресурсів і захищеності основних водоносних комплексів України. Особливо значний потенціал мають дослідження, спрямовані на встановлення частки сучасного живлення, визначення віку та розподілу часу перебування підземних вод, виявлення міжпластового перетікання й перевірку концептуальних гідрогеологічних моделей. Для України це актуально через значну різноманітність гідрогеологічних умов – від багатоповерхових артезіанських систем Дніпровсько-Донецького і Волино-Подільського басейнів до неглибоких алювіальних і тріщинних водоносних систем. Розширення застосування ізотопних трасерів могло б забезпечити незалежну перевірку припущень щодо формування експлуатаційних ресурсів та підвищити надійність оцінки їх відновлюваності й вразливості.

Мета дослідження. Метою роботи є обґрунтування перспектив застосування методів ізотопної гідрології для комплексної оцінки умов формування, відновлюваності, гідравлічних взаємозв'язків і ступеня природної захищеності основних експлуатаційних водоносних горизонтів і комплексів України. Особлива увага приділяється можливостям використання ізотопних показників для визначення джерел і сезонності живлення підземних вод, встановлення частки сучасної інфільтрації, оцінювання інтенсивності водообміну, виявлення гідравлічного зв'язку між водоносними горизонтами та поверхневими водними об'єктами, а також ідентифікації окремих джерел антропогенного забруднення. Практичне значення такого підходу полягає у підвищенні обґрунтованості оцінки експлуатаційних ресурсів підземних вод, їх відновлюваності та вразливості до антропогенних і природних чинників.

Методи дослідження. Методична основа роботи передбачає комплексне використання стабільних і радіоактивних ізотопів, атмосферних трасерів віку води та традиційних гідрогеологічних, гідрохімічних і геоінформаційних методів. Для встановлення генезису, умов і сезонності живлення підземних вод доцільним є аналіз стабільних ізотопів водню і кисню – δ^2H та δ^{18}O. Порівняння їх співвідношення у підземних водах, атмосферних опадах і поверхневих водах із локальними та глобальною метеорними лініями дозволяє ідентифікувати джерела живлення, прояви випаровування до інфільтрації, змішування вод різного походження та можливі гідравлічні зв'язки між компонентами водної системи [4, 6].

Для оцінки сучасності живлення, часу перебування та інтенсивності водообміну перспективним є поєднання тритій-гелієвого методу ^{3}H/^{3}He та атмосферних трасерів – хлорфторвуглеців CFC-11, CFC-12 і CFC-113. Метод ^{3}H/^{3}He дає змогу оцінювати видимий вік молодих підземних вод за співвідношенням залишкового тритію та тритіогенного ^{3}He [5], тоді як CFC-метод ґрунтується на порівнянні їх концентрацій у воді з історичною динамікою в атмосфері [2]. Сам тритій може використовуватися як індикатор присутності сучасного компонента живлення,

а для вод із тривалішим часом перебування доцільним є застосування ^{14}C у поєднанні з $\delta^{13}C$ розчиненого неорганічного вуглецю. Визначення ізотопного складу нітратів за $\delta^{15}N–NO_3$ та $\delta^{18}O–NO_3$ може використовуватися для диференціації основних джерел азотного забруднення [8].

Отримані ізотопні дані доцільно інтерпретувати спільно з результатами визначення хімічного складу підземних вод, рівнів і режиму ґрунтових та міжпластових вод, геологічної будови, потужності й літології водотривких та слабкопроникних відкладів, а також просторового положення потенційних зон живлення і джерел антропогенного навантаження. Такий інтегрований підхід дозволяє використовувати ізотопні характеристики не як ізольований показник, а як додаткове джерело інформації для оцінювання фактичної динаміки водообміну, відновлюваності ресурсів та природної захищеності водоносних горизонтів.

Практичне застосування методів ізотопної гідрології у сфері надрокористування доцільно розглядати через комплекс завдань, пов'язаних із визначенням умов формування підземних вод, оцінкою їх відновлюваності, встановленням гідравлічних взаємозв'язків, природної захищеності водоносних горизонтів і походження антропогенного забруднення. На відміну від традиційних гідрогеологічних і гідрохімічних показників, ізотопний склад води та розчинених у ній компонентів дає можливість отримувати інформацію не лише про поточний стан водоносної системи, а й про процеси її формування та функціонування.

Визначення джерел і умов живлення підземних вод. Одним із ключових завдань при оцінці експлуатаційних ресурсів підземних вод є встановлення територій, джерел та механізмів їх живлення. Стабільні ізотопи водню і кисню (δ^2H та $\delta^{18}O$) є природними трасерами, ізотопний склад яких формується під час проходження води через гідрологічний цикл. Порівняння ізотопних характеристик підземних вод із атмосферними опадами, поверхневими водами та локальною метеорною лінією дозволяє визначати переважні джерела живлення водоносних горизонтів, оцінювати внесок опадів різних сезонів, виявляти роль сніготанення, а також встановлювати прояви випаровування перед інфільтрацією. Це завдання особливо актуальне для багатоповерхових артезіанських басейнів, де окремі водоносні горизонти розділені слабкопроникними товщами, але водночас можуть бути гідравлічно пов'язані через ділянки виклинювання, тектонічні порушення, ерозійні врізи або гідрогеологічні «вікна». У таких умовах встановлення фактичних шляхів формування експлуатаційних ресурсів лише за геологічною будовою та п'єзометричними даними може бути недостатнім. Загальні принципи такого використання стабільних ізотопів підтверджені численними міжнародними дослідженнями [4, 6].

Найбільш показовим прикладом є Дніпровсько-Донецький артезіанський басейн, який характеризується потужною зоною активного водообміну та складною системою взаємопов'язаних водоносних горизонтів. Основне значення для водопостачання тут мають еоценовий, сеноман-нижньокрейдовий та верхньоюрський водоносні комплекси, які широко використовуються для водопостачання Києва, Харкова, Полтави, Сум, Прилук та інших населених пунктів. Значну роль у формуванні ресурсів басейну відіграє вертикальний водообмін між горизонтами, а потужність зони інтенсивного водообміну місцями сягає близько 1000 м. Дослідження тритію у сеноман-келовейському комплексі Києва також засвідчило можливість використання ізотопних даних для індикації змін вертикального водообміну [10].

Саме для таких умов застосування δ^2H і $\delta^{18}O$ може бути корисним для розмежування вод різного походження та перевірки припущень щодо зон живлення сеноман-нижньокрейдових і юрських горизонтів. Наприклад, порівняння ізотопного складу вод верхніх четвертинних та палеогенових горизонтів із водами глибших крейдових і юрських комплексів може дозволити оцінити, чи формуються експлуатаційні ресурси переважно за рахунок повільного регіонального живлення в периферійних частинах басейну, чи до них також надходить молодша вода шляхом вертикального перетікання. Особливо перспективними є ділянки, де геологічна будова створює умови для міжпластового водообміну.

Для територій зі складною гідрогеологічною будовою такий підхід може використовуватися для уточнення положення зон живлення окремих водоносних комплексів і перевірки концептуальних моделей формування їх ресурсів. Ізотопні відмінності між водами різного походження також дозволяють виявляти їх змішування та оцінювати внесок окремих джерел у

формування вод, що надходять до експлуатаційних свердловин. Таким чином, ізотопна інформація може доповнювати результати гідродинамічних досліджень при обґрунтуванні експлуатаційних запасів підземних вод.

Оцінка відновлюваності ресурсів та інтенсивності водообміну. Для раціонального використання підземних вод принципове значення має встановлення не лише величини їх запасів, а й швидкості відновлення та часу перебування води у водоносній системі. У цьому контексті важливу інформацію можуть надавати методи датування молодих підземних вод за співвідношенням $^{3}H/^{3}He$ та за вмістом хлорфторвуглецiв (CFC-11, CFC-12 і CFC-113). Вони найбільш ефективні для вод, що містять компонент живлення другої половини XX – початку XXI століття, тобто для водоносних горизонтів, які беруть участь у відносно активному сучасному водообміні.

Метод $^{3}H/^{3}He$ ґрунтується на радіоактивному розпаді тритію (^{3}H) з утворенням гелію-3 (^{3}He). Після інфільтрації води та її ізоляції від атмосфери вміст тритію поступово зменшується, тоді як кількість тритіогенного ^{3}He збільшується. Співвідношення залишкового ^{3}H та утвореного ^{3}He дозволяє визначати «видимий» час, що минув від моменту живлення водоносного горизонту. Цей метод особливо інформативний для вод, сформованих протягом останніх кількох десятиліть, і може використовуватися для оцінки швидкості вертикального та латерального руху підземних вод, інтенсивності живлення і часу надходження води від області інфільтрації до експлуатаційної свердловини. Для змішаних вод отриманий вік характеризує переважно молодий компонент і має інтерпретуватися з урахуванням моделі змішування. Класичне обґрунтування методу та його застосування для молодих підземних вод наведено у роботі Schlosser et al. [5].

Метод CFC ґрунтується на тому, що концентрації хлорфторвуглецiв в атмосфері протягом другої половини XX століття змінювалися у часі за достатньо добре відомою траєкторією. Під час інфільтрації вода контактує з ґрунтовим повітрям і набуває концентрацій CFC, близьких до рівноважних з атмосферою на момент живлення. Порівняння визначених у підземній воді концентрацій CFC-11, CFC-12 і CFC-113 з історичними атмосферними кривими дозволяє оцінювати видимий вік води. Метод може бути особливо корисним для дослідження вод, що надійшли до водоносного горизонту приблизно з середини XX століття, однак його застосування потребує врахування можливого мікробіологічного руйнування, сорбції, локального техногенного забруднення CFC та змішування вод різного віку. Методичні засади застосування CFC як трасерів і засобів датування молодих підземних вод детально розглянуті Busenberg and Plummer [2].

Найбільш надійні результати можуть бути отримані при спільному використанні $^{3}H/^{3}He$ та кількох сполук CFC. Незалежне визначення видимого віку за різними трасерами дозволяє перевірити узгодженість результатів і виявляти змішування молодих та старіших вод. Відмінності між $^{3}H/^{3}He$- та CFC-віком можуть, у свою чергу, бути діагностичною ознакою складної структури потоку, змішування вод або геохімічної трансформації CFC. Відомості про вік підземних вод можуть використовуватися для оцінювання швидкості живлення, калібрування гідрогеологічних моделей, визначення часу руху води від області живлення до водозабору та оцінювання вразливості експлуатаційного горизонту до надходження забруднювальних речовин.

Для умов України особливо перспективним об’єктом таких досліджень є Дніпровсько-Донецький артезіанський басейн, де експлуатаційне значення мають кілька водоносних горизонтів і комплексів, що залягають на різних глибинах та характеризуються різною інтенсивністю водообміну. Найбільший інтерес для застосування $^{3}H/^{3}He$ та CFC становлять палеогенові, насамперед еоценові, а також альб-сеноманські водоносні горизонти і комплекси у межах зони активного та утрудненого водообміну. Ці води широко використовуються для централізованого водопостачання, а їх фактична відновлюваність залежить від співвідношення безпосереднього живлення, регіонального латерального притоку та міжпластового перетікання.

Особливо актуальними такі дослідження можуть бути в периферійних частинах Дніпровсько-Донецького басейну, де водоносні породи залягають відносно неглибоко або виходять ближче до поверхні, а також у районах великих водозаборів, де тривала експлуатація могла змінити природні напірні співвідношення між горизонтами. Наприклад, побудова профілю від області живлення до центральної частини басейну з одночасним визначенням $^{3}H/^{3}He$, CFC-11, CFC-12 та CFC-113 у водах четвертинних, еоценових і альб-сеноманських горизонтів дозволила б простежити збільшення часу

перебування води за напрямком її руху, встановити ділянки активного сучасного поповнення та виявити зони вертикального перетікання. Для експлуатаційних свердловин це дало б можливість оцінити, чи формується водовідбір переважно за рахунок сучасно відновлюваних ресурсів, чи значну частину становлять води з тривалішим часом перебування у водоносній системі.

Таким чином, застосування $^{3}H/^{3}He$ та CFC у Дніпровсько-Донецькому артезіанському басейні може бути спрямоване не лише на визначення видимого віку підземних вод, а й на вирішення безпосередньо прикладного завдання надрокористування – встановлення швидкості відновлення експлуатаційних ресурсів та розмежування сучасно поновлюваної і повільно відновлюваної складових водообміну. Отримані дані можуть використовуватися для уточнення допустимих експлуатаційних навантажень і перевірки гідродинамічних моделей, що застосовуються при оцінці запасів підземних вод.

Встановлення гідравлічних зв'язків між водоносними горизонтами та поверхневими водами. Одним із ключових питань при експлуатації підземних вод є визначення реальної структури водообміну між окремими водоносними горизонтами, річками, водосховищами та іншими поверхневими водними об'єктами. Гідродинамічні дані не завжди дозволяють однозначно встановити напрям і масштаб такого обміну, особливо за складної геологічної будови або сезонної мінливості рівнів води.

Якщо різні компоненти водної системи мають відмінний ізотопний склад, $\delta^{2}H$ і $\delta^{18}O$ можуть використовуватися як природні трасери їх взаємодії. Це дозволяє встановлювати надходження річкової води до експлуатаційного водоносного горизонту, виявляти перетікання між горизонтами через слабкопроникні товщі або гідрогеологічні «вікна», а також оцінювати змішування вод у межах водозаборів. Такі дослідження мають особливе значення при прогнозуванні наслідків інтенсивного водовідбору, оскільки експлуатація свердловин може змінювати природні градієнти та активізувати надходження вод із суміжних горизонтів або поверхневих джерел.

Оцінка природної захищеності та вразливості водоносних горизонтів. Традиційна оцінка природної захищеності підземних вод переважно ґрунтується на аналізі глибини залягання водоносного горизонту, потужності та літологічного складу перекривних відкладів, їх фільтраційних властивостей і положення потенційних джерел забруднення. Ці показники характеризують потенційні умови проникнення забруднювальних речовин, однак не завжди дають змогу оцінити фактичну швидкість надходження інфільтраційних вод до водоносного горизонту.

У цьому аспекті ізотопні методи можуть надати принципово додаткову інформацію. Виявлення у підземній воді чітко вираженого сучасного ізотопного компонента, зокрема тритію, може свідчити про наявність відносно швидких шляхів інфільтрації або гідравлічного зв'язку з верхніми водоносними горизонтами. Це особливо важливо у випадках, коли за геологічними критеріями горизонт вважається відносно захищеним, але фактичні умови водообміну допускають проникнення молодих вод із земної поверхні. Навпаки, відсутність сучасного компонента поряд з іншими гідрогеологічними ознаками може підтверджувати уповільнений водообмін і вищий ступінь природної ізольованості.

Разом із тим ізотопні показники не повинні розглядатися як самостійний універсальний критерій захищеності. Їх найбільша цінність полягає у перевірці та уточненні концептуальної гідрогеологічної моделі, сформованої на основі геологічних, гідродинамічних і гідрохімічних даних. У такому контексті ізотопні дослідження дозволяють перейти від переважно статичної оцінки захищеності за характеристиками перекривних товщ до оцінки фактичної динаміки водообміну.

Ідентифікація джерел забруднення підземних вод. Для оцінки екологічних ризиків експлуатації водоносних горизонтів важливим є не лише встановлення концентрацій забруднювальних речовин, але й визначення їх походження. Особливо актуальним це є для нітратного забруднення ґрунтових вод у сільськогосподарських, приміських і сільських районах, де одночасно можуть діяти декілька джерел надходження сполук азоту.

Аналіз $\delta^{15}N$ та $\delta^{18}O$ у нітратах дозволяє диференціювати потенційне походження азотного навантаження та разом із гідрохімічними показниками оцінювати роль мінеральних добрив, органічних відходів, стічних вод або інших джерел. Поєднання таких даних із $\delta^{2}H$, $\delta^{18}O$ і ^{3}H води дає можливість одночасно встановлювати джерело забруднення та характер надходження води, яка

його переносить. Це створює передумови для більш обґрунтованого визначення зон санітарної охорони, локалізації джерел ризику та планування заходів із захисту підземних вод. Ефективність такого комплексного підходу була показана, зокрема, для неглибокого міського водоносного горизонту Харкова [9].

Інтеграція ізотопних даних у систему обґрунтування надрокористування. Найбільший практичний ефект ізотопні методи забезпечують не як окремий вид досліджень, а як складова комплексної гідрогеологічної оцінки. Поєднання ізотопних характеристик із даними про геологічну будову, рівні підземних вод, дебіти свердловин, хімічний склад, землекористування та просторове розміщення потенційних джерел впливу дозволяє формувати більш обґрунтовані концептуальні моделі функціонування водоносних систем.

Для практики надрокористування це означає можливість більш достовірно визначати зони формування експлуатаційних ресурсів, оцінювати частку сучасного живлення, виявляти джерела поповнення запасів, прогнозувати можливі наслідки інтенсивного водовідбору та оцінювати ризик надходження забруднювальних речовин. Відповідно, застосування методів ізотопної гідрології може підвищити надійність оцінки ресурсного потенціалу водоносних горизонтів і сприяти переходу від переважно статичного уявлення про запаси підземних вод до оцінювання їх як динамічної та взаємопов'язаної гідрогеологічної системи.

Висновки. Методи ізотопної гідрології мають значний потенціал для підвищення достовірності оцінки ресурсів, умов формування та захищеності експлуатаційних водоносних горизонтів і комплексів України. Їх застосування дозволяє доповнити традиційні гідрогеологічні та гідрохімічні дослідження інформацією про джерела і сезонність живлення, час перебування води у водоносній системі, інтенсивність водообміну, міжпластові та поверхнево-підземні гідравлічні зв'язки.

Використання стабільних ізотопів водню і кисню є особливо перспективним для встановлення генезису підземних вод, зон їх живлення та процесів змішування. Методи датування молодих підземних вод за $^{3}H/^{3}He$ та CFC можуть бути використані для оцінювання часу надходження води до експлуатаційних горизонтів, визначення частки сучасного живлення та уточнення фактичної відновлюваності ресурсів. Особливий практичний інтерес такі дослідження становлять для багатоповерхових систем Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну, де формування експлуатаційних ресурсів визначається поєднанням регіонального латерального потоку, інфільтраційного живлення та міжпластового водообміну.

Ізотопні показники можуть також використовуватися для уточнення природної захищеності водоносних горизонтів. Встановлення присутності молодого компонента води у напірному горизонті дозволяє виявляти фактичні шляхи швидкого водообміну, які не завжди можуть бути визначені лише за геолого-літологічними критеріями. Аналіз стабільних ізотопів нітратів додатково розширює можливості ідентифікації джерел антропогенного забруднення підземних вод.

Найбільшу практичну цінність ізотопні методи мають за умови їх інтеграції з гідрогеологічними, гідродинамічними, гідрохімічними та геоінформаційними даними. Систематичне впровадження таких досліджень в Україні може сприяти удосконаленню оцінки експлуатаційних запасів підземних вод, обґрунтуванню допустимих рівнів водовідбору, оцінці вразливості водоносних горизонтів і формуванню більш надійних концептуальних моделей підземного водообміну.

Список використаних джерел:

1. Avery, E., Samonina, O., Kryshtop, L., Vyshenska, I., Fryar, A. E., & Erhardt, A. M. (2022). Use of isotopes in examining precipitation patterns in north-central Ukraine. Isotopes in Environmental and Health Studies, 58(4–6), 380–401. https://doi.org/10.1080/10256016.2022.2131781
2. Busenberg, E., & Plummer, L. N. (1992). Use of chlorofluorocarbons (CCl_3F and CCl_2F_2) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of central Oklahoma. Water Resources Research, 28(9), 2257–2283. https://doi.org/10.1029/92WR01263
3. Diadin, D., & Vystavna, Y. (2020). Long-term meteorological data and isotopic composition in precipitation, surface water and groundwater revealed hydrologic sensitivity to climate change in

East Ukraine. Isotopes in Environmental and Health Studies, 56(2), 136–148. https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1732369
4. Jasechko, S. (2019). Global isotope hydrogeology–Review. Reviews of Geophysics, 57(3), 835–965. https://doi.org/10.1029/2018RG000627
5. Schlosser, P., Stute, M., Dörr, H., Sonntag, C., & Münnich, K. O. (1988). Tritium/3He dating of shallow groundwater. Earth and Planetary Science Letters, 89(3–4), 353–362. https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90122-7
6. Tweed, S., Leblanc, M., Cartwright, I., Bass, A., Travi, Y., Marc, V., Bach, T. N., Dang Duc, N., Massuel, S., & Kumar, U. S. (2019). Stable isotopes of water in hydrogeology. In Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society (pp. 1–10). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0154
7. Vystavna, Y., Diadin, D., & Huneau, F. (2018). Defining a stable water isotope framework for isotope hydrology application in a large trans-boundary watershed (Russian Federation/Ukraine). Isotopes in Environmental and Health Studies, 54(2), 147–167. https://doi.org/10.1080/10256016.2017.1346635
8. Vystavna, Y., Diadin, D., Yakovlev, V., Hejzlar, J., Vadillo, I., Huneau, F., & Lehmann, M. F. (2017). Nitrate contamination in a shallow urban aquifer in East Ukraine: Evidence from hydrochemical, stable isotopes of nitrate and land use analysis. Environmental Earth Sciences, 76, 463. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6796-1
9. Vystavna, Y., Schmidt, S. I., Diadin, D., Rossi, P. M., Vergeles, Y., Erostate, M., Yermakovych, I., Yakovlev, V., Knöller, K., & Vadillo, I. (2019). Multi-tracing of recharge seasonality and contamination in groundwater: A tool for urban water resource management. Water Research, 161, 413–422. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.028
10. Кошляков, О., Кошлякова, Т., Диняк, О., & Кошлякова, І. (2022). Використання часового та просторового розподілу тритію для індикації змін стану сеноман-келовейського комплексу питних підземних вод на території міста Києва. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 3(98), 80–85. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.10

References:

1. Jasechko, S. (2019). Global isotope hydrogeology–Review. Reviews of Geophysics, 57(3), 835–965. https://doi.org/10.1029/2018RG000627
2. Tweed, S., Leblanc, M., Cartwright, I., Bass, A., Travi, Y., Marc, V., Bach, T. N., Dang Duc, N., Massuel, S., & Kumar, U. S. (2019). Stable isotopes of water in hydrogeology. In Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society (pp. 1–10). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0154
3. Diadin, D., & Vystavna, Y. (2020). Long-term meteorological data and isotopic composition in precipitation, surface water and groundwater revealed hydrologic sensitivity to climate change in East Ukraine. Isotopes in Environmental and Health Studies, 56(2), 136–148. https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1732369
4. Vystavna, Y., Diadin, D., & Huneau, F. (2018). Defining a stable water isotope framework for isotope hydrology application in a large trans-boundary watershed (Russian Federation/Ukraine). Isotopes in Environmental and Health Studies, 54(2), 147–167. https://doi.org/10.1080/10256016.2017.1346635
5. Avery, E., Samonina, O., Kryshtop, L., Vyshenska, I., Fryar, A. E., & Erhardt, A. M. (2022). Use of isotopes in examining precipitation patterns in north-central Ukraine. Isotopes in Environmental and Health Studies, 58(4–6), 380–401. https://doi.org/10.1080/10256016.2022.2131781
6. Vystavna, Y., Schmidt, S. I., Diadin, D., Rossi, P. M., Vergeles, Y., Erostate, M., Yermakovych, I., Yakovlev, V., Knöller, K., & Vadillo, I. (2019). Multi-tracing of recharge seasonality and contamination in groundwater: A tool for urban water resource management. Water Research, 161, 413–422. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.028

7. Vystavna, Y., Diadin, D., Yakovlev, V., Hejzlar, J., Vadillo, I., Huneau, F., & Lehmann, M. F. (2017). Nitrate contamination in a shallow urban aquifer in East Ukraine: Evidence from hydrochemical, stable isotopes of nitrate and land use analysis. Environmental Earth Sciences, 76, 463. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6796-1
8. Koshliakov O., Koshliakova T., Dyniak O., & Koshliakova I. (2022). Experience of isotope technologies application to study changes in deep-water potable aquifers state within Kyiv in conditions of long-term operation. Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 3(98), 80-85. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.10 [In Ukrainian]
9. Schlosser, P., Stute, M., Dörr, H., Sonntag, C., & Münnich, K. O. (1988). Tritium/3He dating of shallow groundwater. Earth and Planetary Science Letters, 89(3–4), 353–362. https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90122-7
10. Busenberg, E., & Plummer, L. N. (1992). Use of chlorofluorocarbons (CCl_3F and CCl_2F_2) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of central Oklahoma. Water Resources Research, 28(9), 2257–2283. https://doi.org/10.1029/92WR01263