

**РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СУЧАСНОГО СТАНУ
ПІТНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД СЕНОМАН-КЕЛОВЕЙСЬКОГО
КОМПЛЕКСУ НА ТЕРИТОРІЇ КИЇВСЬКОЇ
МІСЬКОЇ АГЛОМЕРАЦІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ІЗОТОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Кошляков О. Є., Диняк О. В., Кошлякова Т. О.

ВСТУП

На теперішній час антропогенні зміни довкілля призводять до значного порушення природного процесу кругообігу води у навколишньому середовищі. Зокрема, відбувається зміна процесу формування, циркуляції та розвантаження підземних вод в межах територій міських агломерацій. Функціонування систем водовідведення стічних вод, будівництво доріг, різноманітних споруд призводить до того, що площа територій, в межах яких відбувається інфільтрація опадів, суттєво зменшується, а води, що надходять до водоносних горизонтів, характеризуються вкрай високим рівнем забрудненості біогенними та неорганічними речовинами, нафтопродуктами і стійкими органічними сполуками. В Україні це перетворюється у вкрай гостру проблему внаслідок воєнних дій, що мають з боку країни-агресора росії не лише всі риси тероризму та геноциду, але й екоциду.

У цьому зв'язку питання стійкого забезпечення населення України якісною питною водою, що вилучається чи може бути вилучена із підземних водоносних горизонтів і комплексів, є дуже актуальним. Територія м. Києва не є виключенням. Навпаки, в умовах воєнних дій або інших надзвичайних ситуацій, що можуть призвести до блекауту, підтримання функціонування багатомільйонної столиці набуває пріоритетного характеру.

**1. Короткі відомості з водопостачання м. Києва за рахунок
підземних вод із сеноман-келовейського комплексу**

Підземні води в межах Києва є джерелом централізованого та боветного питного водопостачання, тому вивчення особливостей змін їх гідродинамічної та гідрогеохімічної складових у процесі експлуатації заслуговують на особливу увагу.

Сеноман-келовейський водоносний комплекс (інша назва – водоносний комплекс у відкладах іваницької світи середньої та верхньої юри та загорівської, журавинської, бурімської світ нижньої та верхньої

крейди) є важливим джерелом питного водопостачання у м. Києві. Даний комплекс в межах міста поширений повсюдно, крім місць переходу покрівлі верхньоюрської товщі у водотриви потужністю до 10 м і більше (урочище Пуща-Водиця, ділянки в долині Дніпра). В покрівлі комплексу залягають відносно водотривкі мергельно-крейдові відклади верхньої крейди, в підшві – водотривкі глини та алеврити середньої і верхньої юри. Водовмісні породи представлені різними стратиграфічними і літолого-фаціальними різновидами. Верхню частину водовмісних відкладів складають сеноманські відклади верхньої крейди, які представлені вапняковмісними пісками дрібно- і тонкозернистими, нижче – середньо- і крупнозернистими, місцями гравелистими, із стяжінними кременю, з лінзами пісковиків часто окременілих, з прошарками глин та алевритів. Потужність водовмісних порід верхньої товщі змінюється від 4 до 18 м. Глибина залягання водоносного комплексу змінюється від 53 м (о. Водників) до 148 м (Чоколівка). Рівні встановлюються на глибинах від 4 м (Дарниця, Гідропарк) до 142 м (Чоколівка). Відповідно, абсолютні відмітки складають 97,9 і 39,1 м. Води напірні, напори змінюються в межах від 2 м (Чоколівка) до 86,8 м (м. Вишневе) і складають в середньому 30-50 м. За хімічним складом води комплексу гідрокарбонатні кальцієві і гідрокарбонатні кальцієво-натрієво-калієві. Вони характеризуються малою мінералізацією (0,2-0,4 г/дм³), твердість складає 4-6 мг-екв/дм³. Величина рН коливається в межах від 6,8 до 8,2. Основне живлення водоносного комплексу здійснюється на вододільних просторах. Проте значна доля в живленні належить водам, які перетікають із водоносних горизонтів, що залягають вище, навіть за наявності відносно водотривкої мергельно-крейдианої товщі і водотривких відкладів київських мергелів. Про це свідчить тривалий досвід експлуатації водоносного комплексу з кінця XIX століття. В умовах, порушених експлуатацією, більша частина вод комплексу розвантажується в межах водозаборів. Режим даного водоносного комплексу тісно пов'язаний з величиною водовідбору підземних вод і положенням рівня води у Дніпрі¹. Слід звернути увагу, що після аварії на Чорнобильській АЕС для забезпечення населення міста чистою питною водою, починаючи з 1991 року, було облаштовано широку мережу бюветних комплексів, кількість яких постійно нарощувалася. На сьогодні до цієї мережі входить 203 бювети (працюючих – 175), з них 92 експлуатує сеноман-келовейський водоносний комплекс. Якість води у бюветах

¹ Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в нарушенных условиях / [Шестопапов В. М., Огняник Н. С., и др.] ; отв. ред. Шестопапов В. М.; АН УССР, Ин-т геологических наук. К. : Наук. думка, 1991. 528 с.

контролюється на предмет перевищення ГДК у відповідності до нормативного документу ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». При виявленні перевищення концентрацій нормованих компонентів в окремих бюветях їх закривають для споживачів. Отже, наявний контроль якості буювотної води носить локальний характер і не дозволяє оцінити уразливість підземних вод до антропогенного впливу системно та по площі.

З точки зору геологічної будови сеноман-келовейський водоносний комплекс вважається захищеним на правобережжі р. Дніпро (крім Оболоні) та умовно захищеним на лівому березі. Комплекс є більш ізольованим від зовнішніх джерел живлення порівняно із залягаючим вище водоносним горизонтом у відкладах канівської і бучацької серій еоцену.

2. Антропогенні зміни в сеноман-келовейському водоносному комплексі

Слід зазначити, що внаслідок антропогенної діяльності зростає інтенсивність і глибина водообміну. Наслідком вилучення підземних вод є той факт, що під час формування у водоносних горизонтах і комплексах лійок депресії виникає небезпека низхідної фільтрації забруднених ґрунтових вод за рахунок вертикального перерозподілу гідродинамічних напорів, що може вплинути на якість підземних вод. Отже, будь-яке забруднення, що формується в умовах населеного пункту, в тому числі забруднення ґрунтів, упродовж 10–20 років може призвести до надходження забруднювальних речовин до глибинних водоносних горизонтів і комплексів. Експлуатація питних підземних вод на території м. Києва призвела до:

- зміни режиму і балансу підземних вод, що експлуатуються, а також суміжних з ними водоносних горизонтів;
- формування великих депресій поверхонь гідродинамічних напорів;
- зміни напрямку руху підземного потоку (трансформація областей розвантаження в області живлення);
- зміни якості підземних вод по площі та в розрізі;
- зниження рівня ґрунтових вод та пов'язаних із цим процесами зміни ландшафтних умов².

² Кошляков, О., Диняк, О., Кошлякова, І. (2012). Виснаження та забруднення питних водоносних горизонтів в умовах інтенсивної експлуатації на території м. Києва. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 56, 38–42.

Зокрема, експлуатація підземних вод сеноман-келовейського комплексу призвела до утворення великих за площею та глибоких ліюк депресії і відповідного перепаду гідродинамічних напорів з горизонтом у відкладах канівської і бучацької серій еоцену. Останнє забезпечило активну низхідну фільтрацію через крейдяно-мергельну товщу верхньої крейди у таких зонах. У свою чергу, перебудова водообміну у водоносному горизонті у відкладах канівської і бучацької серій еоцену та сеноман-келовейському водоносному комплексі призвела також до антропогенних змін у крейдяно-мергельній товщі верхньої крейди, що їх розділяє. Отже, внаслідок багаторічної експлуатації підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу на території м. Києва у структурі водообміну відбулися істотні зміни³. У долинах річок у районах підземних водозаборів було зафіксовано найбільш значну інверсію потоку: зони природної висхідної фільтрації перетворилися місцями в ділянки активної низхідної фільтрації. Відмічалася також інтенсифікація низхідної фільтрації. Значною мірою змінилася структура латеральної фільтрації комплексу, швидкість якої у середньому зросла в 1,5 рази порівняно з природною. За даними Ю.Ф. Руденка та ін.⁴, річка Дніпро та Київське водосховище за роки інтенсивної експлуатації підземних вод перетворились на потужні додаткові (а подекуди й основні) джерела живлення останніх, які можна розглядати як один із гарантованих чинників формування експлуатаційних запасів підземних вод. Під впливом водовідбору відбулась значна інтенсифікація перетікання між водоносними горизонтами і комплексами, що в свою чергу вплинуло на проникність роздільних шарів і на швидкість відновлення гідродинамічних напорів за останні 20 років.

За результатами власних досліджень авторів, зазначені вище зміни у структурі водообміну віддзеркалились у суттєвій зміні поверхні гідродинамічних напорів сеноман-келовейського водоносного комплексу⁵. Окрім того, за даними хімічних аналізів зразків води зі свердловин станом на 2010 р. було виявлено загальну тенденцію

³ Шестопапов В. М. Методы изучения естественных ресурсов подземных вод. М. : Недра, 1988. 168 с.

⁴ Руденко, Ю.Ф., Шестопапов, В.М., Негода, Ю.О., Гураль, О.В. (2021). Рациональное использование эксплуатационных запасов подземных вод для водопостачання м. Київ. *Геологічний журнал*, 4, 29–55. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240101>

⁵ Кошлякова, Т., Кошляков, О., Долін, В., Скрипкін, В. (2015). Оцінка інтенсивності водообміну в сеноман-келовейському водоносному комплексі на території м. Києва в умовах техногенного впливу. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 68, 66–70. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.68.11.66-70>

до погіршення класу якості води в межах території м. Києва та встановлено, що зміни основних компонентів хімічного складу підземних вод комплексу на території міста мають, як і зміни поверхні гідродинамічних напорів, нерівномірний за площею характер і залежать від інтенсивності експлуатації⁶. Тобто станом на 2005–2010 рр. спостерігалась загальна тенденція до погіршення екологічного стану сеноман-келовейського комплексу, головним чинником якого є довготривалий видобуток підземних вод. Проте результати геолого-економічної переоцінки експлуатаційних запасів Київського родовища питних підземних вод, виконаної у 2017 р.⁷, свідчать про таке. Порівняно з періодом проведення попереднього гідрогеологічного вивчення території Києва у 1972 р.⁸ видобуток підземних вод із сеноман-келовейського комплексу після 2008 р. значно скоротився (орієнтовно зменшився у 4 рази), а п'єзометрична поверхня підвищилася приблизно на 10,0–20,0 м. Тобто протягом останніх років внаслідок скорочення видобутку підземних вод спостерігається порівняно швидке відновлення гідродинамічних напорів досліджуваного водоносного комплексу. З цього можна зробити висновок, що за останні роки стан сеноман-келовейського водоносного комплексу поступово повертався до природного. Якщо це дійсно так, то за останній період часу повинна також спостерігатися позитивна тенденція змін хімічного складу підземних вод комплексу в бік його повернення до природного стану.

3. Результати досліджень сучасного гідродинамічного та гідрохімічного стану сеноман-келовейського водоносного комплексу

Дослідження гідродинамічного та гідрохімічного стану водоносних горизонтів і комплексів, що залягають на значній глибині, встановлення тенденцій та причин їх змін являє собою складну комплексну задачу.

⁶ Кошляков, О.Є., Кошлякова, Т.О. (2014). Виявлення динаміки змін хімічного складу підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу у м. Києві за допомогою методів математичної статистики. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 3(141), 5–10.

⁷ Федоренко, А.С., Буян, Н.Н., Нікіташ, Ю.О. (2017). Геолого-економічна переоцінка експлуатаційних запасів Київського родовища питних підземних вод для ПрАТ «АК «Київводоканал» в м. Києві. Київська гідрогеологічна експедиція ДП «Українська геологічна компанія».

⁸ Литвак, Д.Р., Кузьменко, Г.А., Соловицкий, В.Н. и др. (1972). Гидрогеологические условия и оценка эксплуатационных запасов подземных вод района г. Киева (по состоянию на 01.01.1972 г.). К., Министерство геологии УССР, Киевский геологоразведочный трест.

Як зазначає В. М. Шестопапов⁹, складовими водообміну в гідрогеологічній структурі є живлення та розвантаження підземних вод, підземний стік у загальній структурі потоку. Інтенсивність водообміну визначається рухливістю підземних вод при їх переміщенні усередині гідрогеологічної системи або її частини. Вона залежить від крайових умов, просторового розподілу параметрів і розмірів геофільтраційного потоку та інтегрально віддзеркалює усю сукупність згаданих факторів. Кількісними показниками інтенсивності водообміну є витрата підземних вод у модульній формі, темп (тривалість) водообміну та швидкість руху підземних вод.

Авторами при оцінці інтенсивності водообміну було виконано орієнтовні розрахунки темпу водообміну в сеноман-келовейському водоносному комплексі та швидкості вертикального руху підземних вод у підземній водообмінній системі.

Темп водообміну визначається відношенням ємнісних (пружних та гравітаційних) запасів підземних вод до витрати потоку. Це можливий умовний час заміщення підземних вод, які містяться у виділеному об'ємі гідрогеологічної системи. Як зазначається у роботі¹, природні ресурси у сеноман-келовейському водоносному комплексі на 21–26% формуються за рахунок атмосферних опадів, а підземний стік у річки складає 3–6%. Темпи природного водообміну в сеноман-келовейському водоносному комплексі у межах Придніпровського району такі: з поверхневими водами 1400–6000 років, а повний водообмін 800–4000 років. Для території м. Києва природний темп повного водообміну складає приблизно 850 років.

За даними В. М. Шестопалова та ін.¹, у м. Києві внаслідок багаторічної експлуатації питних підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу в структурі водообміну відбулися істотні зміни. У долинах річок в районах підземних водозаборів зафіксована найбільш значна інверсія потоку: зони природної висхідної фільтрації перетворилися місцями в ділянки активної низхідної фільтрації і, відповідно, додаткового живлення сеноман-келовейського водоносного комплексу. При цьому модуль додаткового живлення на території м. Києва перевищив величину модуля природного висхідного розвантаження в 6–10 разів. Відмічається інтенсифікація низхідної фільтрації і, відповідно, збільшення величини живлення сеноман-келовейського водоносного комплексу внаслідок водовідбору на лівобережжі та правобережжі долини р. Дніпро, яке зросло більш як у 10 разів. Значною мірою змінилася структура латеральної фільтрації сеноман-келовейського

⁹ Шестопапов В. М. Исследование темпов водообмена в водоносных геосистемах. *Геологический журнал*. 1986. Т. 46, № 6. С. 114–121.

водоносного комплексу, швидкість якої у природних умовах складала $2\text{--}15 \text{ м} \times \text{доба}^{-1}$. Зараз вона зросла в 1,5 рази, а в зонах активного впливу водозабірних свердловин, де відмічається найбільш активна зміна напрямку фільтрації у бік водозаборів, – більше, ніж у 10 разів. Фактично водозабори перетворилися у головні дренаючі системи водоносного комплексу, а ті ділянки у долинах річок, які не охоплені п'єзометричними лійками, на сьогодні являють собою лише додаткові зони розвантаження. На ділянках інтенсивного інверсійного живлення в зонах впливу водозаборів темп водообміну зріс у 6 разів.

Зазначені вище зміни в структурі водообміну віддзеркалюються у зміні поверхні п'єзометричних напорів сеноман-келовейського водоносного комплексу, що ілюструється побудованими авторами схематичними картами п'єзоізогіпс станом на 1960 рік та 2005 рік (рис. 1, 2)⁵.

Оскільки природний темп повного водообміну у сеноман-келовейському водоносному комплексі складає приблизно 850 років, а на ділянках інтенсивного інверсійного живлення в зонах впливу водозаборів темп водообміну зріс у 6 разів, можна вважати, що темп водообміну станом на 1990 рік складав приблизно 140 років. Враховуючи, що при збільшенні водовідбору прогнозувалося збільшення темпу водообміну в 10 разів, можна припустити, що темп повного водообміну в сеноман-келовейському водоносному комплексі на початок 2000-х років дорівнював приблизно 80 рокам.

Для підтвердження суттєвої ролі ґрунтових вод у формуванні водних ресурсів сеноман-келовейського комплексу авторами було виконано відповідний розрахунок. Як зазначається в роботі¹, близько 90% балансу підземної водообмінної системи на території м. Києва формується за рахунок підземних вод олігоцен-четвертинних відкладів. За даними¹⁰, величина інтенсивності природного інфільтраційного живлення ґрунтових вод по м. Києву станом на 2005 рік дорівнювала $0,000081\text{--}0,000673 \text{ м} \times \text{доба}^{-1}$, в середньому приблизно $0,0004 \text{ м} \times \text{доба}^{-1}$. Площа території міста складає приблизно 840 км^2 , тому ресурси, що формуються за рахунок природного інфільтраційного живлення, приблизно дорівнюють: $0,0004 \text{ м} \times \text{доба}^{-1} \times 840 \times 10^6 \text{ м}^2 \times 365 \text{ діб} = 0,123 \text{ км}^3$.

Методика розрахунку загальних ресурсів сеноман-келовейського водоносного комплексу ґрунтувалася на обчисленні ємнісних та пружних запасів підземних вод за усередненими значеннями таких

¹⁰ Кошляков О.Є., (2011). Моніторинг гідрогеодинамічної складової геологічного середовища урбанізованих територій (на основі ГІС) : автореферат дис. ... доктора геологічних наук : 04.00.05 / Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К., 33.

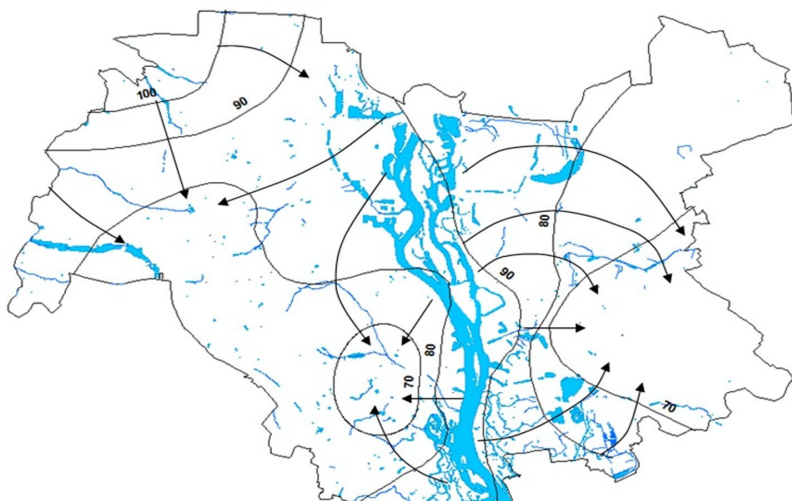


Рис. 1. Схематична карта п'єзоіогіє сеноман-келовейського водоносного комплексу станом на 1960 рік, стрілками показано напрямк руху потоку підземних вод

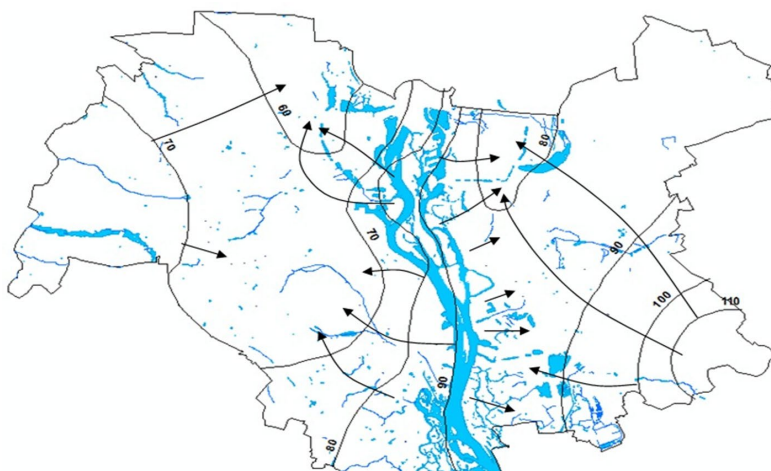


Рис. 2. Схематична карта п'єзоіогіє сеноман-келовейського водоносного комплексу станом на 2005 рік, стрілками показано напрямк руху потоку підземних вод

гідрогеологічних характеристик як потужність водонасичених порід, величина гідродинамічного напору над покрівлею, а також параметрів гравітаційної ємності та пружної водовіддачі водоносного пласта. В якості розрахункових значень зазначених характеристик були прийняті величини, що наведені у виробничих звітах з оцінки запасів підземних вод по м. Києву. Загальні ресурси сеноман-келовейського водоносного комплексу в межах м. Києва за розрахунками авторів складають приблизно 0,587 км³.

Таким чином, частка атмосферних опадів у ресурсах сеноман-келовейського водоносного комплексу дорівнює приблизно 21%: 0,123 км³ / 0,587 км³ × 100% = 21%.

Для визначення швидкості вертикального руху підземних вод у водообмінній системі на території м. Києва авторами виконані відповідні гідродинамічні розрахунки. Оскільки максимальна швидкість визначається швидкістю руху в найменш проникному шарі, було розраховано приблизний час проходження води крізь крейдяно-мергельну товщу верхньої крейди за залежністю (1):

$$t = \frac{\Delta l^2 \cdot n_a}{k \cdot \Delta H}, \quad (1)$$

де t – час проходження води, Δl – довжина шляху фільтрації, n_a – активна пористість k – коефіцієнт фільтрації, ΔH – різниця п'єзометричних напорів.

За даними А.О. Сухореброго¹, потужність крейдяно-мергельної товщі складає 60 м, її активна пористість дорівнює 0,05. Коефіцієнт фільтрації товщі за даними польових досліджень змінюється в межах від 0,000058 до 0,0035 м×доба⁻¹, за даними лабораторних визначень – від 0,001 до 0,1 м×доба⁻¹. Тому при розрахунках часу проходження води прийнято значення коефіцієнту фільтрації 0,001 м/доба.

Різниця п'єзометричних напорів між водоносним горизонтом еоценових відкладів та сеноман-келовейським водоносним комплексом станом на 1990 рік становила від 10 до 50 м. Станом на 2010 рік прогнозувалося його збільшення до 30–70 м.

Виходячи з наведених вище даних, приблизний час проходження води крізь крейдяно-мергельну товщу верхньої крейди у 1990 році становив від 49 до 10 років (у середньому 30 років), а станом на 2010 рік прогнозний час повинен був дорівнювати від 16 до 7 років (у середньому 12 років).

Як стверджують А.Е. Бабинець та ін.¹¹, при аналізі умов водообміну в значний інтерес можуть представляти ізотопно-радіохімічні дані, особливо при дослідженні взаємозв'язку між водоносними горизонтами при перетіканні через слабопроникні пласти, через літологічні вікна, по зонам тектонічних порушень, а також при вивченні умов руху підземних вод безпосередньо у водоносних горизонтах та при палеогідро-геологічних реконструкціях. В.М. Шестопалов та ін.¹² також вважають, що можливість виявлення ультрамікрокількостей радіоактивних нуклідів у пробах природних вод за допомогою порівняно простих засобів дозволяє вважати радіоактивні індикатори вельми ефективними.

Слід зазначити, що на сьогодні застосування ізотопних технологій при гідрогеохімічних дослідженнях водоносних горизонтів і комплексів є перспективним напрямом¹³. Методи ізотопної гідрогеології входять до числа основних наукових методів, що використовуються для відстеження особливостей руху підземних вод і оцінки віку наявних підземних вод¹⁴. Вода, відповідно до походження та умов формування, має різні ізотопні ознаки, що залишають унікальний «слід». Різні ізотопи, що містяться у воді, виступають як «мітки», які можна використовувати для визначення джерела, віку, руху і взаємодії води як над поверхнею Землі, так і під нею. Ізотопні технології дозволяють оцінити оптимальність використання водних ресурсів, необхідних для сталого розвитку. За допомогою ізотопних методів вивчення компонент гідрологічного та гідрогеологічного циклу можливо оцінювати кількість і якість водних ресурсів, а також їх стійкість до антропогенного впливу. Зокрема, використання ізотопів природного походження як індикаторів дозволяє з'ясувати шляхи поповнення підземних вод, їхнє походження, напрямок фільтрації, ступінь захищеності¹⁵.

¹¹ Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины / Бабинец А. Е., Боровский Б. В., Шестопалов В. М. и др. К. : Наук. думка, 1979. 216 с.

¹² Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Методы изучения водообмена / [Шестопалов В. М., Ситников А. Б., Лялько В. И. и др.] ; отв. ред. В. М. Шестопалов ; АН УССР, Ин-т геологических наук. К. : Наук. думка, 1988. 272 с.

¹³ IAEA bulletin 60-1 April 2019. Water. (2019). Retrieved from <https://www.iaea.org/bulletin/60-1>

¹⁴ Brkic, Z., Kuhta, M., Hunjak, T., Larva, O. (1983). Regional Isotopic Signatures of Groundwater in Croatia. *Water*, 7(12), 58–65. <https://doi.org/10.3390/w12071983>

¹⁵ Kambuku, D., Tsujimura, M., Kagawa, S., Mdala, H. (2003). Corroborating stable isotopic data with pumping test data to investigate recharge and groundwater flow processes in a fractured rock aquifer, Rivirivi Catchment, Malawi. *Environmental Earth Sciences*, 6(77), 34–42. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7403-9>

Вивчення ізотопного складу води відкриває нові можливості для оцінки формування підземних вод. На даний час вже накопичений певний досвід у вирішенні різноманітних гідрогеологічних задач за допомогою природних стабільних та радіоактивних ізотопів у зоні активного водообміну. Застосовують, як правило, наступні ізотопи: стабільні – дейтерій (D) та кисень (^{18}O); радіоактивні – тритій (T), радіовуглець (^{14}C), радій (^{226}Ra) та радон (^{222}Rn). У порівнянні зі стабільними радіогенні ізотопи у зв'язку з їх природним (радіоактивним) розпадом дозволяють принципово виконувати оцінку часу перебування води у горизонті (оцінювати «вік» підземних вод та час водообміну). Обираючи ізотопи з різним періодом напіврозпаду, можна розширити віковий діапазон досліджуваних вод. В результаті ізотопного опробування можна отримати карту-схему та профільні розрізи ізоконцентрацій ізотопу, що застосовується. Грунтуючись на них, можна уточнити гідродинамічну схему досліджуваного об'єкту.

Авторами для встановлення просторових і часових антропогенних змін у сеноман-келовейському водоносному комплексі на території м. Києва були використані ізотопно-радіохімічні дані, що базуються на виявленні закономірностей поширення радіоактивного ізотопу водню – тритію. Тритій розглядався як індикатор уразливості підземних вод до антропогенного впливу. Вибір саме тритію був обумовлений тим, що він є одним із найпоширеніших у природі серед легких радіоактивних ізотопів і бере участь в усіх процесах кругообігу води. Поряд із стабільним аналогом він може досить легко мігрувати в складі вологи повітряних і водних потоків, а також накопичуватись як компонент мінеральних та органічних сполук.

Авторами за показником активності тритію у підземних водах визначалися відсоток надходження поверхневих вод до сеноман-келовейського водоносного комплексу та час, за який води з поверхні надходять до цього комплексу. Дослідження включало відбір проб поверхневих і підземних вод, їх підготовку до аналізу, власне лабораторний аналіз та розрахунок вмісту тритію. Лабораторний аналіз базувався на застосуванні методики рідинної сцинтиляційної радіометрії – вимірюванні вмісту радіоактивних компонентів за допомогою рідинних сцинтиляторів. Цей метод вважається найзручнішим практичним способом вимірювання активності тритію в рідкому стані, що полягає в розчиненні або диспергуванні тритій-вмісної сполуки в рідинному сцинтиляторі з наступним реєструванням числа світлових спалахів. Сцинтиляційна рідина складається з однієї або декількох флуоресцентних речовин, розчинених у відповідних розчинниках. Енергію іонізованих частинок поглинає в основному

розчинник. Частина цієї енергії передається сцинтилятору, в якому вона перетворюється на світлову, яка здатна проникати крізь рідину до фотоелектронного детектора. При виконанні дослідження використано сучасну сцинтиляційну рідину, яка широко використовується у лабораторній практиці – OPTIPHASE HiSafe 3 виробництва фірми «Perkin-Elmer». До її складу входять нонілфенолетоксилат, ефір діетаноламінофосфатної кислоти, 3,6-диметил-4-октин-3,6-діол, ізомери діізопропілнафталіну та деякі інші сполуки. Зразки для вимірювання було підготовлено наступним чином: до 8 мл води додавалося 12 мл сцинтиляційної рідини. Отриманий зразок поміщувався до спеціальної ємності. Безпосередньо вимірювання активності тритію було здійснено на сучасному високочутливому приладі, призначеному для низькофонових вимірювань – ультранизкофоновому рідинно-сцинтиляційному α - β -спектрометрі Quantulus 1220-003 виробництва Фінляндії. Закладання зразків до приладу виконувалося партіями по 20 штук.

Концентрація тритію у поверхневих водах м. Києва складає приблизно $10 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$ ¹⁶. За даними досліджень авторів, середнє значення вмісту тритію у підземних водах сеноман-келовейського водоносний комплексу на території Києва становить $5,6 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$. За цими даними було виконано розрахунок відсотку надходження поверхневих вод до сеноман-келовейського водоносного комплексу. Для цього використовувалась формула, яка запропонована Е.В. Соботовичем, Г.М. Бондаренком, В.Є. Ветштейном та ін.¹⁷:

$$Q = -\frac{1}{\tau} \ln \frac{y-g}{y_0-g} \times V, \quad (2)$$

де Q – кількість води, що надходить до підземних вод з поверхні, м³; τ – час надходження, діб; y – існуюча концентрація радіоактивного ізотопу (тритію) у підземних водах водоносного комплексу, $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$; y_0 – початкова концентрація радіоактивного ізотопу у підземних водах, $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$; g – концентрація ізотопу у поверхневих водах, що надходять, $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$; V – об'єм водоносного комплексу, м³.

Об'єм сеноман-келовейського водоносного комплексу в межах міста за розрахунком авторів дорівнює приблизно 59 км^3 . Якщо прийняти, що $\tau = 365$ діб, $y = 5,6 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$; $y_0 = 0 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$; $g = 10 \text{ Бк} \times \text{дм}^{-3}$, то об'єм

¹⁶ Тритій у біосфері = Tritium in the biosphere / [В. В. Долін, О. В. Пушкарьов, І. Ф. Шраменко та ін.]; за ред. Е. В. Соботовича, В. В. Доліна; [НАН України, Ін-т геохімії навколиш. середовища]. К.: Наук. думка, 2012. 222, [2] с.: іл., табл. (Проект «Наукова книга» = “Scientific book” project).

¹⁷ Изотопно-геохимические методы оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод / Э. В. Соботович, Г. Н. Бондаренко, В. Е. Ветштейн и др. К.: Наук. думка, 1977. 156 с.

поверхневих вод, які надходять до водоносного комплексу за рік, буде дорівнювати $0,133 \text{ км}^3$. Це складає приблизно 23% від ресурсів сеноман-келовейського водоносного комплексу, що добре узгоджується з даними, наведеними В.М. Шестопаловим (21–26%).

Для визначення часу надходження поверхневих вод до сеноман-келовейського водоносного комплексу, враховуючи період напіврозпаду тритію (12,26 років), було складено графік та отримано рівняння регресії, які дозволяють визначити час надходження поверхневих вод до цього комплексу (рис. 3).

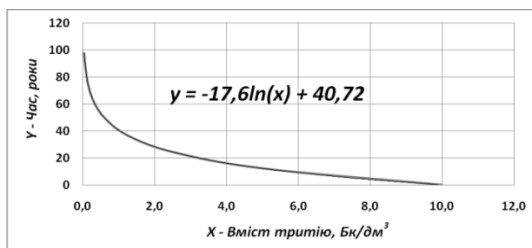


Рис. 3. Залежність часу надходження поверхневих вод до сеноман-келовейського водоносного комплексу від вмісту тритію у воді

Отже залежність, яка дозволяє розрахувати час надходження поверхневих вод до сеноман-келовейського водоносного комплексу τ має наступний вигляд:

$$\tau = -17,6 \times \ln(x) + 40,72, \quad (4.5)$$

де τ – час надходження, діб; x – існуюча концентрація тритію у підземних водах водоносного комплексу, $\text{Бк} \times \text{дм}^{-3}$.

За цими даними, час надходження поверхневих вод до сеноман-келовейського водоносного комплексу дорівнює 10,4 роки, що відповідає наведеним вище результатами гідродинамічного розрахунку приблизного часу проходження води крізь крейдяно-мергельну товщу верхньої крейди (12 років).

У подальшому авторами виконано порівняння вмісту тритію у сеноман-келовейському водоносному комплексі у 2014 та 2017 рр.¹⁸. Проби води відбирались з бюветів міста, пробурених на сеноман-

¹⁸ Koshliakova, T., Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I. (2021). Tritium content as indicator of Cenomanian-Callovian groundwater complex state changes as a result of long-term operation within Kyiv city. 20th International Conference “Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects”, 11–14 May 2021, Kiev, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521053>

келовейський водоносний комплекс (77 проб у 2014 р. та 80 проб у 2017 р.) Порівняння здійснювалось за допомогою статистичної обробки отриманих даних про вміст тритію. Оскільки водоносний комплекс, що досліджується, на території міста має однорідну геологічну будову, а бюветні комплекси, що на нього облаштовані, розташовані статистично рівномірно і випадково, була використана модель випадкової величини. Результати визначення тритію на 2014 та 2017 рр. розглядалися як окремі вибірки. Для кожної з них було розраховано такі величини: середнє арифметичне, вибіркоче стандартне відхилення, коефіцієнти асиметрії та ексцесу. В результаті перевірки гіпотези про відповідність вибіркових розподілів нормальному закону розподілу за допомогою правила «трьох сигм» встановлено, що з імовірністю 0,99 не можна стверджувати, що вибіркочі розподіли не підкоряються нормальному закону. Тому було прийнято гіпотезу про нормальність розподілу вмісту тритію для обох вибірок. Далі було перевірено гіпотезу про належність згаданих вибірок до однієї генеральної сукупності за допомогою дисперсійного аналізу (застосований F-критерій Фішера) та порівняння середніх арифметичних (застосований t-критерій Стюдента). Якщо припустити, що протягом 2014–2017 рр. хімічний стан підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу в цілому змінився, вибірки вмісту тритію не повинні належати до однієї генеральної сукупності. Аналіз результатів показав, що вибірки не належать до однієї генеральної сукупності, оскільки їх дисперсії різні. Тому можна стверджувати, що протягом 2014–2017 рр. хімічний стан підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу загалом змінився. Зменшення дисперсії вибірки вмісту тритію станом на 2017 р. порівняно з 2014 р. свідчить про те, що має місце зменшення нерівномірності розподілу тритію по площі на фоні незмінного середнього арифметичного значення. Саме це дає підстави вважати, що в останні роки на території в цілому існує позитивна тенденція змін хімічного стану підземних вод комплексу в бік його поступового повернення до природного стану.

Для дослідження характеру змін вмісту тритію за площею протягом згаданого періоду часу було застосовано математичний апарат просторового аналізу і моделювання в геоінформаційних системах, реалізований за допомогою програмного засобу ArcGIS 10.4.1¹⁹.

¹⁹ Dyniak, O., Koshliakova, T., Koshliakova, I., Koshliakov, O. (2021). Spatial analysis and modeling of tritium content in groundwater of Senoman- Callovian aquatic complex on the territory of Kyiv for the purpose of assessing changes in its ecological condition in time. XV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, 17–19 November 2021, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2055>

Спочатку за наявними фактичними даними вмісту тритію було побудовано картограми вмісту тритію в підземних водах сеноман-келовейського водоносного комплексу на території м. Кисва станом на 2014 та 2017 рр. Для побудови картограм застосований метод зворотних зважених відстаней. Після цього виконано оверлейний аналіз, у результаті чого отримано схематичну картограму змін вмісту тритію у підземних водах за згаданий період часу. Автори враховували імовірну похибку вхідних даних математико-картографічних побудов, тому картограма створена за "принципом світлофору" способом якісного фону. Вона наочно показує, де відбулося збільшення вмісту тритію (червоний колір), де вміст зменшився (зелений колір), а де суттєвих змін не відбулося (жовтий колір) (рис. 3).

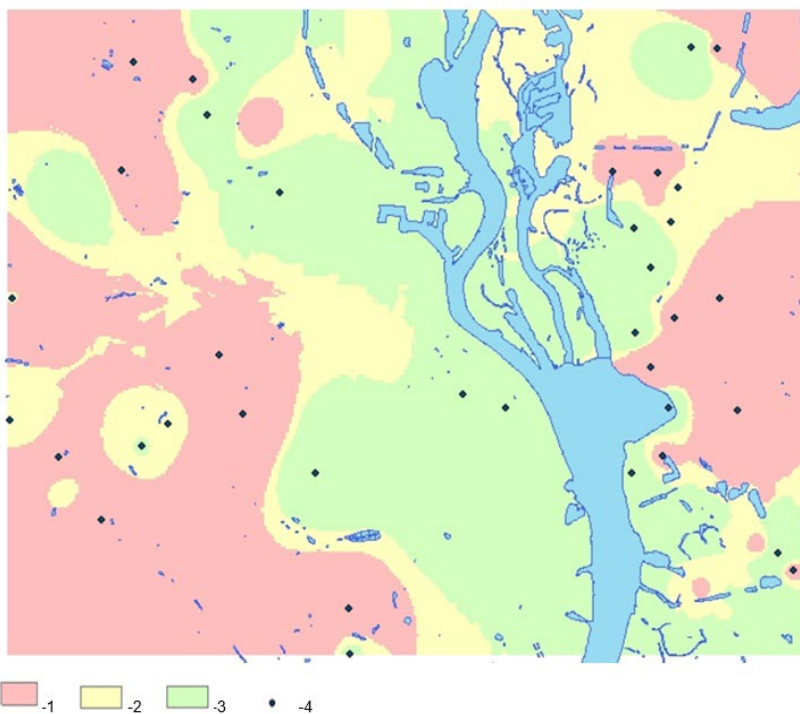


Рис. 3. Схематична картограма змін вмісту тритію у підземних водах сеноман-келовейського водоносного комплексу протягом 2014–2017 років (де 1 – вміст тритію збільшився, 2 – вміст тритію сталий, 3 – вміст тритію зменшився, 4 – свердловини)

Отримані результати було проаналізовано з урахуванням геолого-гідрогеологічної будови території м. Києва, зміни динаміки водовідбору з водоносного комплексу сеноман-келовейських відкладів та висновків, що були зроблені на підставі попередньо згаданої статистичної обробки. Аналіз наведеної схематичної картограми дозволяє стверджувати, що протягом 2014–2017 рр. на переважній частині території м. Києва відбулися зміни вмісту тритію у підземних водах сеноман-келовейського водоносного комплексу. Причому в межах території, що наближена до р. Дніпро, переважає загальна тенденція до зменшення вмісту тритію, а в межах території, що віддалена від річки, вміст тритію збільшився. З погляду геолого-гідрогеологічної будови території м. Києва збільшення вмісту тритію збігається або з більш захищеною від забруднення територією поширення водоносного комплексу⁷, або з ділянками старої забудови та промисловими зонами на лівому березі р. Дніпро. Найінтенсивніше зменшення вмісту тритію спостерігається переважно у заплаві Дніпра.

ВИСНОВКИ

Результати орієнтовних балансових розрахунків інтенсивності водообміну в системі підземних вод на території м. Київ, виконані авторами, свідчать, що на теперішній час частка атмосферних опадів у формуванні ресурсів сеноман-келовейського водоносного комплексу дорівнює приблизно 21%. Це узгоджується з даними, отриманими раніше В.М. Шестоपालовим та ін. За результатами гідродинамічних розрахунків час проходження води крізь крейдяно-мергельну товщу верхньої крейди дорівнює 7–16 років, у середньому 12 років. Оскільки максимальна швидкість вертикального руху підземних вод визначається швидкістю руху в найменш проникному шарі, можна зробити висновок про те, що час надходження поверхневих вод до сеноман-келовейського водоносного комплексу на території Києва складає приблизно 12 років.

Виконані авторами розрахунки інтенсивності водообміну в сеноман-келовейському водоносному комплексі за даними вмісту тритію у підземних та поверхневих водах на території м. Київ добре узгоджуються з висновками, які викладені у попередніх роботах. Так, частка поверхневих вод у складі сеноман-келовейського водоносного комплексу становить 23%, а час надходження – приблизно 10,4 роки. Отже, вміст тритію у підземних водах об'єктивно віддзеркалює результат сполученого впливу природних та антропогенних чинників на формування підземного вертикального водообміну.

Виявлені авторами зміни вмісту тритію у питних водах сеноман-келовейського комплексу протягом 2014–2017 рр. можна пояснити такими причинами. Відомо, що в природному стані (наприкінці XIX ст.) р. Дніпро в межах території м. Києва являла собою область розвантаження сеноман-келовейського водоносного комплексу, а внаслідок тривалої експлуатації вона поступово перетворилася переважно в область живлення. Відновлення гідродинамічних напорів водоносного комплексу, що відбувається за останні роки внаслідок скорочення видобутку підземних вод, викликало тренд поступового повернення гідродинамічного стану комплексу до природного. Отже, водообмін між підземними водами комплексу та поверхневими водами характеризується тенденцією до зменшення кількості поверхневої води, що потрапляє в підземні води. Відповідно, кількість тритію, джерелом якого є поверхневі води, у водоносному комплексі поблизу Дніпра зменшується в часі внаслідок латеральної фільтрації.

Зміна умов вертикального водообміну внаслідок скорочення видобутку підземних вод відбувається значно повільніше порівняно з латеральними змінами. Тому швидкість потрапляння тритію у підземні води водоносного комплексу внаслідок вертикального водообміну або суттєво не змінюється, або дещо збільшується на більш захищених від забруднення ділянках території та на ділянках з підвищеним техногенним навантаженням. Отже, висновки, отримані за допомогою статистичного і просторового аналізу вмісту тритію у підземних водах протягом 2014–2017 рр., підтверджують, що на сьогодні у межах території м. Києва спостерігається позитивна тенденція до повільного поступового повернення сеноман-келовейського водоносного комплексу до свого природного стану.

Результати дослідження вмісту тритію у воді вказують на наявність антропогенного впливу на формування хімічного складу підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу. За даними про вміст тритію виявлено найбільш уразливі ділянки на території м. Києва. Це долина р. Дніпро, частини Придніпровської низовини (лівобережжя р. Дніпро) та долини малих річок.

АНОТАЦІЯ

Питання стійкого забезпечення населення України, зокрема м. Києва, якісною питною водою, що вилучається чи може бути вилучена із підземних водоносних горизонтів і комплексів, є дуже актуальним, особливо в умовах воєнних дій або інших надзвичайних ситуацій. На території м. Києва важливим джерелом питного водопостачання є сеноман-келовейський водоносний комплекс.

У роботі узагальнені та систематизовані результати досліджень авторів стосовно гідродинамічного і гідрохімічного стану сеноман-келовейського водоносного комплексу та території Київської промислової агломерації з урахуванням антропогенних змін. В основу досліджень покладені балансові та гідродинамічні розрахунки із використанням ізотопно-радіохімічних даних (вміст у воді тритію).

ЛІТЕРАТУРА

1. Водобмен в гидрогеологических структурах Украины. Водобмен в нарушенных условиях / [Шестопапов В. М., Огняник Н. С., и др.]; отв. ред. Шестопапов В. М.; АН УССР, Ин-т геологических наук. К. : Наук. думка, 1991. 528 с.
2. Кошляков, О., Диняк, О., Кошлякова, І. (2012). Виснаження та забруднення питних водоносних горизонтів в умовах інтенсивної експлуатації на території м. Києва. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 56, 38–42.
3. Шестопапов В. М. Методы изучения естественных ресурсов подземных вод / В. М. Шестопапов. М. : Недра, 1988. 168 с.
4. Руденко, Ю.Ф., Шестопапов, В.М., Негода, Ю.О., Гураль, О.В. (2021). Рациональне використання експлуатаційних запасів підземних вод для водопостачання м. Київ. *Геологічний журнал*, 4, 29–55. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240101>
5. Кошлякова, Т., Кошляков, О., Долін, В., Скрипкін, В. (2015). Оцінка інтенсивності водообміну в сеноман-келовейському водоносному комплексі на території м. Києва в умовах техногенного впливу. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 68, 66–70. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.68.11.66-70>
6. Кошляков, О.Є., Кошлякова, Т.О. (2014). Виявлення динаміки змін хімічного складу підземних вод сеноман-келовейського водоносного комплексу у м. Києві за допомогою методів математичної статистики. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 3(141), 5–10.
7. Федоренко, А.С., Буян, Н.Н., Нікіташ, Ю.О. (2017). Геолого-економічна переоцінка експлуатаційних запасів Київського родовища питних підземних вод для ПрАТ «АК «Київводоканал» в м. Києві. Київська гідрогеологічна експедиція ДП «Українська геологічна компанія».
8. Литвак, Д.Р., Кузьменко, Г.А., Соловицкий, В.Н. и др. (1972). Гидрогеологические условия и оценка эксплуатационных запасов подземных вод района г. Киева (по состоянию на 01.01.1972 г.). К., Министерство геологии УССР, Киевский геологоразведочный трест.

9. Шестопапов В. М. Исследование темпов водообмена в водоносных геосистемах. *Геологический журнал*. 1986. Т. 46, № 6. С. 114–121.

10. Кошляков О.Є., (2011). Моніторинг гідрогеодинамічної складової геологічного середовища урбанізованих територій (на основі ГИС) : автореферат дис. ... доктора геологічних наук : 04.00.05 / Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К., 33.

11. Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины / Бабинец А. Е., Боревский Б. В., Шестопапов В. М. и др. К. : Наук. думка, 1979. 216 с.

12. Водообмен в гидрогеологических структурах Украины. Методы изучения водообмена / [Шестопапов В. М., Ситников А. Б., Лялько В. И. и др.] ; отв. ред. В. М. Шестопапов ; АН УССР, Ин-т геологических наук. К. : Наук. думка, 1988. 272 с.

13. IAEA bulletin 60-1 April 2019. Water. (2019). Retrieved from <https://www.iaea.org/bulletin/60-1>

14. Brkic, Z., Kuhta, M., Hunjak, T., Larva, O. (1983). Regional Isotopic Signatures of Groundwater in Croatia. *Water*, 7(12), 58-65. <https://doi.org/10.3390/w12071983>

15. Kambuku, D., Tsujimura, M., Kagawa, S., Mdala, H. (2003). Corroborating stable isotopic data with pumping test data to investigate recharge and groundwater flow processes in a fractured rock aquifer, Rivirivi Catchment, Malawi. *Environmental Earth Sciences*, 6(77), 34–42. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7403-9>

16. Тритій у біосфері = Tritium in the biosphere / [В. В. Долін, О. В. Пушкар'єв, І. Ф. Шраменко та ін.] ; за ред. Е. В. Собоновича, В. В. Доліна ; [НАН України, Ін-т геохімії навколиш. середовища]. – К : Наук. думка, 2012. 222, [2] с. : іл., табл. (Проект «Наукова книга» = “Scientific book” project).

17. Изотопно-геохимические методы оценки степени взаимосвязи подземных и поверхностных вод / Э. В. Собонович, Г. Н. Бондаренко, В. Е. Ветштейн и др. К. : Наук. думка, 1977. 156 с.

18. Koshliakova, T., Koshliakov, O., Dyniak, O., Koshliakova, I. (2021). Tritium content as indicator of Cenomanian-Callovia groundwater complex state changes as a result of long-term operation within Kyiv city. 20th International Conference “Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects”, 11–14 May 2021, Kiev, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521053>

19. Dyniak, O., Koshliakova, T., Koshliakova, I., Koshliakov, O. (2021). Spatial analysis and modeling of tritium content in groundwater of Senoman-Callovia aquatic complex on the territory of Kyiv for the purpose of assessing

changes in its ecological condition in time. XV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, 17–19 November 2021, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2055>

Information about the authors:

Koshliakov Oleksii Yevhenovych,

Doctor of Geological Sciences,
Head of the Department of Hydrogeology and Engineering Geology
Taras Shevchenko National University of Kyiv
90, Vasylkivska str., Kyiv, 03022, Ukraine

Dyniak Oksana Vasylivna,

Candidate of Geological Sciences,
Associate Professor at the Department of Hydrogeology
and Engineering Geology
Taras Shevchenko National University of Kyiv
90, Vasylkivska str., Kyiv, 03022, Ukraine

Koshliakova Tetiana Oleksiivna,

Candidate of Geological Sciences,
Doctoral Student
M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore
Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine
34, Palladina Ave., Kyiv, 03142, Ukraine