

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240111>
УДК 556.3.04+556.314

Д.О. БУГАЙ^{1*}, Б.Ю. ЗАНОЗ¹, Т.В. ЛАВРОВА²,
К.О. КОРИЧЕНСЬКИЙ², Ю.І. КУБКО¹, Р. АВІЛА³, Ю.М. РЕЦЬ⁴

¹ Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна
E-mail: dmitri.bugay@gmail.com; bzanoz@gmail.com; yury.kubko@gmail.com

² Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ, Україна
E-mail: lavrova@uhmi.org.ua; korychenskyi@gmail.com

³ AFRY, Stockholm, Sweden
E-mail: rodolfo.avila@afry.com

⁴ ДП «Бар'єр», Кам'янське
E-mail: smsgv1978@gmail.com

* Автор для кореспонденції

РОЗВИТОК СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПІДЗЕМНИХ ВОД У ЗОНІ ВПЛИВУ ОБ'ЄКТІВ СПАДЩИНИ УРАНОВОГО ВИРОБНИЦТВА ПРИДНІПРОВСЬКОГО ХІМІЧНОГО ЗАВОДУ

Представлені результати робіт з відновлення і розвитку системи гідрогеологічного моніторингу на майданчику Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське) і обстеження підземних вод із залученням вдосконаленої системи спостережних свердловин (вперше після 2016 р.). У ході робіт уточнено дані про геологічну будову, виконано дослідно-фільтраційні роботи і проведено опробування підземних вод на ряді об'єктів спадщини уранового виробництва, що раніше не були охоплені спостереженнями. Розпочато автоматизовані спостереження за рівнями ґрунтових вод. У результаті одержано нову інформацію про сезонну динаміку рівнів ґрунтових вод. Виявлені нові джерела серйозного хімічного і радіоактивного забруднення геологічного середовища на Південному майданчику Придніпровського хімічного заводу, зокрема в зоні басейнів-відстійників № 220 і 230. На Північному майданчику виявлено радіоактивне забруднення підземних вод з перевищенням фонових рівнів на ділянці «історичного» відстійника нижче хвостосховища «Центральний Яр». На додаток до раніше відомих хімічних токсикантів (Mn, Ni, Pb) у результаті проведених моніторингових робіт встановлено забруднення підземних вод у зоні впливу об'єктів Придніпровського хімічного заводу миш'яком та і ртуттю. Таким чином, забруднення під-

Цитування: Бугай Д.О., Заноз Б.Ю., Лаврова Т.В., Кориченський К.О., Кубко Ю.І., Авіла Р., Рець Ю.М. Розвиток системи моніторингу підземних вод у зоні впливу об'єктів спадщини уранового виробництва Придніпровського хімічного заводу. *Геологічний журнал*. 2021. № 4 (377). С. 56—70. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240111>

Citation: Bugai, D.O., Zanoz, B.Yu., Lavrova, T.V., Korychensky, K.O., Kubko, Yu.I., Avila R., Rets, Yu.M. (2021). Development of the groundwater monitoring system in the zone of influence of uranium production legacy facilities of the Prydniprovsky Chemical Plant. *Geologičnij žurnal*, 4 (377), 56-70. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240111>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2021. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC-BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2021. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

земних вод на Південному промисловому майданчику формується під впливом більшої кількості техногенних джерел, ніж вважалося раніше. Виявлені нові джерела забруднення потребують додаткового обстеження і врахування при прогнозуванні довгострокових впливів Південного майданчика Придніпровського хімічного заводу на геологічне середовище і поверхневу водну систему р. Коноплянка—р. Дніпро.

Ключові слова: Придніпровський хімічний завод; гідрогеологічний моніторинг; забруднення підземних вод; об'єкт спадщини уранового виробництва.

1. Вступ

Урановидобувні і переробні підприємства, споруджені на «світанку» ядерної ери в кінці 1940—1950-х роках минулого століття, у багатьох випадках перетворилися на серйозні джерела радіоактивного і хімічного забруднення оточуючого гідрогеологічного середовища (Hu et al., 2010; NEA..., 2014; Romanchuk et al., 2020; Dinis, Fiúza, 2021), оскільки в той час бракувало практичного досвіду і часто була відсутня нормативна база для належного захисту людини і оточуючого середовища від небезпечних впливів радіоактивних компонентів і супутніх хімічних токсикантів, що властиві зазначеним об'єктам. До подібних радіаційно та екологічно небезпечних об'єктів належить колишнє виробниче об'єднання «Придніпровський хімічний завод» (ПХЗ), розташоване у промисловому передмісті м. Кам'янське (колишній Дніпродзержинськ) Дніпропетровської області. Підприємство було побудовано у 1949 р. у рамках ядерної програми колишнього СРСР для гідрометалургійної переробки уранових руд з метою вилучення урану та супутніх хімічних виробництв (Кузовов, 1997). Функціонування підприємства з 1949 по 1991. призвело до створення дев'яти хвостосховищ, що містять близько 42 млн т відходів переробки уранових руд. Після зупинки переробки уранових руд у 1991 р. виробничі об'єкти ПХЗ не були належним чином виведені з експлуатації або законсервовані. Крім хвостосховищ, на промисловому майданчику ПХЗ містяться інші численні забруднені будівлі та технологічні споруди, включаючи покинуті радіохімічні цехи, що використовувалися для вилучення урану з перероблених руд, ставки-відстійники хімічних виробництв, а також забруднені ґрунти на ділянках, що використовувались для зберігання уранової руди або які були забруднені аварійними розливами з трубопроводів, процесами атмосферної дисперсії тощо (Lavrova, Voitsekho-vich, 2013). Наразі за технічної і фінансової до-

помоги ЄС на цьому «майданчику ядерної спадщини» реалізується комплексна програма підготовчих заходів з приведення об'єктів ПХЗ в екологічно безпечний стан (Facilia AB, 2015).

Об'єкти спадщини уранового виробництва на ділянці ПХЗ являють собою потенційні джерела радіоактивного (радіоактивні ізотопи ряду розпаду урану-238) і хімічного забруднення підземних та поверхневих водних систем, таких як р. Коноплянка, що протікає вздовж північного периметра ПХЗ, та р. Дніпро (рис. 1) (Skalskji et al., 2011; Процак та ін., 2013; Korychenskyi et al., 2019). Огляд робіт з гідрогеологічного моніторингу ПХЗ в 2012—2013 рр. був представлений в нещодавно опублікованій в «Геологічному журналі» роботі (Ткаченко та ін., 2020). В подальші 5—6 років роботи з гідрогеологічного моніторингу ПХЗ були згорнуті через недостатнє фінансування та організаційні складнощі оператора майданчика ядерного спадку, яким є ПХЗ, ДП «Бар'єр».

Мережа спостережних свердловин з моніторингу підземних вод, яка була створена на об'єктах ПХЗ на початку 1990-х років, незважаючи на спорудження кількох додаткових свердловин у 2008—2009 і 2012 рр., з часом значною мірою вийшли з ладу (наприклад, обсадні труби спостережних свердловин кородували або були фізично пошкоджені, фільтри були замулені тощо) і станом на 2019—2020 рр. мережа моніторингу підземних вод не була достатньою і функціональною (Бугай, Ткаченко, Заноз, 2020).

Забруднення ґрунтових та поверхневих вод у зоні впливу ПХЗ є джерелом потенційних ризиків для місцевого населення. З метою дослідження проблеми забруднення ґрунтових вод Норвезьке агентство радіаційного захисту в 2019—2021 рр. надало грант (проект технічної допомоги) Міністерству енергетики та захисту довкілля України (бенефіціару) та оператору майданчика ПХЗ — ДП «Бар'єр» (кінцевому користувачу). Мета робіт полягала у віднов-

ленні і вдосконаленні системи гідрогеологічного моніторингу на майданчику ПХЗ і проведення обстеження підземних вод із залученням вдосконаленої системи спостережних свердловин. Нижче представлені результати робіт за зазначеним проектом.

У рамках робіт було проведено опробування підземних вод на ряді об'єктів, що раніше не були охоплені гідрогеологічними спостереженнями. Аналітичні дослідження на зразках відібраної води включали розширений перелік потенційно небезпечних токсичних хімічних елементів.

2. Матеріали і методи

2.1. Опис об'єкта досліджень: гідрогеологічні умови і джерела техногенного забруднення підземних вод

Головним водоносним горизонтом, що становить інтерес для моніторингу підземних вод на ділянці ПХЗ, є перший від поверхні землі безнапірний водоносний горизонт у піщаних і суглиннистих алювіальних відкладах, які присутні на всій території промислового майданчика ПХЗ та в межах хвостосховища «Дніпровське». Цей водоносний горизонт характеризується відносно високими фільтраційними властивостями, що створює умови для латеральної міграції забруднень у цьому водоносному горизонті за межі промислового майданчика ПХЗ та у напрямку поверхневих водотоків (річки Коноплянка, Дніпро). В межах хвостосховищ «Дніпровське» і «Західне» присутній так званий «техногенний» водоносний горизонт у водонасиченому хвостовому матеріалі. У випадку хвостосховища «Західне» це водоносний горизонт типу «верховодка». Гідрогеологічний розріз території ПХЗ наведено на рис. 2. Детальний опис гідрогеологічних умов ПХЗ представлено в працях (Бугай, Скальський, Авіла, 2008; Skalskji et al., 2011; Ткаченко та ін., 2020).

2.1.1. Джерела забруднення

Перелік основних радіаційно та хімічно небезпечних джерел забруднення водних ресурсів на майданчику ПХЗ включає такі об'єкти (див. рис. 1) (Facilia AB, 2015):

- хвостосховище «Західне»;
- хвостосховище «Центральний Яр»;
- хвостосховище «Південно-східне»;

- хвостосховище «Дніпровське»;
- комплекс забруднених будівель радіохімічних цехів у центральній частині Південного майданчика ПХЗ (будівлі № 104, 103, 2Б тощо) (на цій ділянці спостерігалися численні розливи технологічних розчинів та інші інциденти, що спричинили значне техногенне забруднення ґрунтів);

- ставки-шламовідстійники для хімічних відходів № 220 (належать ДП «Смоли») та № 230 (належать ТОВ «Поліхімпром»);

- ділянка для вивантаження уранової руди (в східній частині Південного майданчика ПХЗ).

До потенційних джерел забруднення геологічного середовища відноситься також ділянка, розташована в Північному секторі ПХЗ нижче хвостосховища «Центральний Яр», яка позначена на старих схемах ПХЗ як «відстійник» (див. рис. 1). За свідченнями колишніх співробітників ПХЗ, цей об'єкт використовувався для скидів технологічних відходів переробки уранових руд на першому етапі функціонування підприємства (до створення хвостосховищ «Західне» і «Центральний Яр») (згідно з усними повідомленнями Л. Царенка). Зараз цю місцевість займає пустир. Не відомо, чи відходи з цього відстійника залишились на місці і були перекриті ґрунтовим екраном, чи вони були вилучені і перевезені на інше хвостосховище.

Роботи з моніторингу підземних вод на ділянці ПХЗ у 2005—2016 рр. були зосереджені переважно на хвостосховищах «Західне», «Центральний Яр», «Південно-східне» та «Дніпровське» (Skalskji et al., 2011; Korychenskyi et al., 2019; Ткаченко та ін., 2020). Дані про фізико-хімічні і радіаційні характеристики відходів у хвостосховищах ПХЗ висвітлені в роботах (Бугай, Скальський, Авіла, 2008; Процак та ін., 2013; Bугай et al., 2015; Korychenskyi et al., 2019). Інші перелічені вище потенційно екологічно небезпечні об'єкти не були забезпечені моніторинговими свердловинами.

2.1.2. Основні забруднювачі підземних вод

Попередні моніторингові дослідження на об'єктах ПХЗ виявили серйозне забруднення підземних вод радіонуклідами ряду розпаду урану-238. Так, максимальне значення урану (U-238 + U-234) у порових водах техногенного водоносного горизонту (водонасичені уранові



Рис. 1. Ситуаційна схема промислового майданчика ПХЗ і хвостосховища «Дніпровське»: 1 — хвостосховище «Західне»; 2 — відстійник № 220; 3 — відстійник № 230; 4 — хвостосховище «Центральний Яр»; 5 — комплекс радіохімічних цехів; 6 — майданчик розвантаження уранової руди; 7 — хвостосховище «Південно-східне»; 8 — «історичний» відстійник на Північному майданчику

Fig. 1. Schematic map of the industrial site of the PChP and the tailings "Dniprovskoe": 1 — tailings "Zahidne"; 2 — settling pond No. 220; 3 — settling pond No. 230; 4 — tailings "Centralny Yar"; 5 — complex of radiochemical workshops; 6 — uranium ore unloading site; 7 — tailings "Pivdenno-skhidne"; 8 — "historic" settling pond on the Northern site



Рис. 2. Геологічний розріз промислового майданчика ПХЗ по лінії хвостосховище «Західне» — р. Коноплянка — хвостосховище «Дніпровське» (лінія розрізу показана на рис. 1)

Fig. 2. Geological section of the PChP industrial site along the line "Zakhidne" tailings — Konoplyanka River — "Dniprovskoe" tailings (the section line is shown in Fig. 1)

хвосту) у 2005—2015 рр. становило 1290 Бк/л у хвостосховищі «Західне» і 168 Бк/л у хвостосховищі «Дніпровське» (для порівняння, ГДК урану в питній воді становить 1 Бк/л). Максимальна активність урану в алювіальному водоносному горизонті в зоні впливу хвостосховища «Західне» дорівнювала 1173 Бк/л, а в зоні впливу хвостосховища «Дніпровське» — 164 Бк/л. У зоні впливу хвостосховищ також спостерігалося хімічне забруднення підземних вод макроіонами (сульфат-іоном, магнієм, амонієм, нітратами та ін.) та токсичними металами (Mn, Pb, Ni, As та ін.) (Ткаченко та ін., 2020). В цитованій вище роботі зазначається, що в попередніх моніторингових дослідженнях ПХЗ зразки підземних вод аналізувалися щодо вмісту відносно невеликого переліку хімічних елементів, тому актуальним є розширення спектра досліджуваних хімічних токсикантів.

2.2. Бурові і дослідно-фільтраційні роботи

2.2.1. Бурові роботи

Бурові роботи з обладнання нових спостережних свердловин були виконані інститутом ДП «УКРНТІ ПРОМТЕХНОЛОГІЯ» (м. Жовті Води), що має багаторічний досвід проведення подібних робіт на майданчику ПХЗ. Застосовано колонкове буріння самохідною буровою установкою УГБ-1ВС діаметром 191 мм із промиванням водою. Для обсадних колон використані труби НПВХ діаметром 110 мм, обладнані фільтром з поліпропіленовим покриттям на перфорованому трубному каркасі із одношаровим гравійним обсипанням. Після обладнання свердловини здійснено її прокачування до освітлення води протягом 3 годин за допомогою заглибного електронасосу.

2.2.2. Дослідно-фільтраційні роботи

Дослідно-фільтраційні роботи виконано методом експрес-наливу в свердловини. Для проведення експрес-наливів для реєстрації рівня (тиску) води у свердловині використано електронні програмовані датчики TD-Diver (Van Essen Instruments, Нідерланди) (<https://www.vanessen.com/products/data-loggers/td-diver/>). Крок реєстрації рівня води становив 1—5 с. Коефіцієнт фільтрації визначено за допомогою методу Боуера-Райса (Bouwer, Rice, 1976). Для обробки результатів польових робіт було ви-

користано аналітичний інструмент, створений на основі таблиць Excel (<https://sourceforge.net/projects/hydrotools/>).

2.2.3. Вибір зразків води із свердловин

Перед відбором проб підземних вод свердловини попередньо прокачували для видалення застійної води з обсадної колони свердловини до стабілізації фізико-хімічних параметрів води (температура, рН, електропровідність). На кожній свердловині визначали рівень ґрунтових вод (РГВ), фізико-хімічні параметри (рН, Eh, температура, електропровідність). Під час відбору проби фільтрували через проточний касетний фільтр з порами розміром 1 мкм.

Проби об'ємом 2 л для визначення вмісту радіонуклідів U-(238,234), Ra-226 було законсервовано 7М азотною кислотою до рН 1. Проби для визначення ізотопів Pb-210, Po-210 об'ємом 1 л було законсервовано 6М соляною кислотою до рН 1. Проби води об'ємом 1,5 л для визначення гідрохімічного складу, вмісту важких металів не підкислювались.

2.3. Аналітичні методи

2.3.1. Радіонукліди ряду розпаду урану-238

Визначення активності ізотопів урану (238, 234), свинцю-210 і полонію-210 проведено альфа-спектрометричним методом із відповідною радіохімічною підготовкою (Бахур и др., 2003, 2007, 2009). Для контролю втрат активності в ході виконання радіохімічних процедур використано атестовані розчини ізотопного індикатора U-232 і Po-209, відповідно. Вимірювання виконано із застосуванням низькофонового УМФ-2000 із спектрометричною платою та альфа-спектрометричного комплексу «Прогрес-альфа». Для визначення активності ізотопів радію-226 використано методику на основі рідинно-сцинтиляційної спектрометрії із вимірюваннями на спектрометрі Triathler фірми Hidex (Методичні..., 2005).

Мінімальна детектована активність (МДА) при довірчій ймовірності 0,95 для ізотопів урану (238, 234) визначена на рівні 0,001 Бк/л, для радію-226 — 0,002 Бк/л (при часі експозиції 10 000 с), для полонію-210 — 0,003 Бк/л, свинцю-210 — 0,006 Бк/л (при експозиції 50 000 с). Контроль точності виконано для кожної серії з п'яти проб шляхом додавання до повторних

аліквот однієї з проб окремо зразкових радіоактивних розчинів ^{210}Pb , ^{226}Ra (у рівновазі з продуктами розпаду). Для перевірки достовірності вимірювань лабораторія Українського гідрометеорологічного інституту, де проведено вимірювання, щорічно бере участь у професійному тестуванні Міжнародного агентства атомної енергії (МАГАТЕ) з визначення природних і штучних радіонуклідів у модельних водних пробах, пробах ґрунтів і біоті (IAEA..., 2010).

2.3.2. Макро-іони

Визначення вмісту головних макро-іонів: катіонів (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+) та аніонів (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-) виконано за відповідними стандартними гідрохімічними методами аналізу. Детальний опис методів наведено в праці (Ткаченко та ін., 2020).

2.3.3. Токсичні метали

Для визначення токсичних металів (As, Cd, Co, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, Ti, V) застосовано енергодисперсійний рентген-флуоресцентний аналізатор EDX-8100 з модулем продування гелієм (Shimadzu, Японія). Пробопідготовка для аналізу включала в себе випаровування зразків води до сухого залишку та пресування в таблетки на підкладку з солі борної кислоти. Для кількісного аналізу сухого залишку після випаровування використано еталонні матеріали виробництва МАГАТЕ (SL-1, SL-3, IAEA-158, IAEA-405, IAEA-457, RGU-1, RGTh-1) та WEPAL (ISE-954).

3. Результати

3.1. Принципи відновлення і вдосконалення мережі моніторингу підземних вод ПХЗ

3.1.1. Головні завдання системи моніторингу підземних вод ПХЗ

При плануванні робіт з вдосконалення системи гідрогеологічного моніторингу ПХЗ враховувалося, що ця система повинна охарактеризувати такі параметри (Бугай, Ткаченко, Заноз, 2020):

- розподіл рівнів підземних вод у межах промислового майданчика ПХЗ та хвостосховища «Дніпровське» з метою оцінки напрямків руху підземних вод (та міграції забруднювачів);

- умови забруднення підземних вод у безпосередній близькості до основних потенційних джерел промислового забруднення (уранові хвостосховища, ставки-шламонакопичувачі, забруднені поверхневі ґрунти тощо);

- просторовий розподіл забруднюючих речовин у ореолах забруднення підземних вод, що сформувалися від промислових джерел, за допомогою профілів спостережних свердловин, орієнтованих вздовж потоку ґрунтових вод;

- фонові умови забруднення підземних вод (у пунктах спостережень вище за течією від джерел);

- винос забруднюючих речовин у підземних водах за межі промислового майданчика ПХЗ та хвостосховища «Дніпровське» у напрямку поверхневих водних об'єктів — річок Коноплянка та Дніпро.

3.1.2. Підхід до відновлення та розвитку мережі моніторингу підземних вод на ділянці ПХЗ

Реконструкцію та розвиток системи моніторингу підземних вод спадкових уранових об'єктів ПХЗ доцільно планувати як поетапний процес (зважаючи на поточну інформацію про гідрогеологічні умови, а також беручи до уваги бюджетні обмеження на відповідні роботи).

Станом на 2019—2020 рр. в якості пріоритету було визначено відновлення спостережних свердловин, що мають довгі ряди моніторингових спостережень за попередній період, які були пошкоджені або вийшли з ладу за останній період після 2011—2013 рр. (зокрема, в зонах впливу хвостосховищ «Західне» і «Дніпровське»). Також було визначено доцільним охарактеризувати гідрогеологічні умови для ряду пріоритетних потенційно небезпечних промислових джерел (наприклад, ставків-шламовідстійників, комплексу забруднених радіохімічних цехів тощо (Facilia AB, 2015), де станом на 2019—2020 рр. спостережні гідрогеологічні свердловини були взагалі відсутні.

При проектуванні розвитку мережі моніторингу були враховані геологічні та гідрогеологічні умови, включаючи залягання та потужність водонасиченої товщі алювіального водоносного горизонту на території ПХЗ та очікувані напрямки фільтрації підземних вод згідно з моделюванням на фільтраційній моделі ПХЗ (Skalskji et al., 2011). Місце розташуван-

ня нових моніторингових свердловин обиралися за межами зони можливих земляних робіт (з облаштування екранів хвостосховищ, вилучення забруднених ґрунтів тощо), що заплановано в рамках «дорожньої карти» ремедіації ПХЗ (Facilia AB, 2015).

3.2. Результати бурових і дослідно-фільтраційних робіт

На першому етапі робіт з реконструкції системи моніторингу підземних вод ПХЗ у листопаді 2019 р. для тестування технології буріння та облаштування свердловин були пробурені дві «пілотні» свердловини № 1-2019 (в зоні впливу хвостосховища «Західне») та 2-2019 (в зоні впливу об'єкта № 220) (див. рис. 1).

У листопаді 2020 — січні 2021 рр. у рамках другого етапу робіт з реалізації описаної концепції розвитку мережі моніторингу підземних вод ПХЗ було споруджено ще десять моніторингових свердловин: в зонах впливу хвостосховищ «Західне», «Дніпровське», об'єкта № 230, основного комплексу забруднених будівель у центральній частині Південного майданчика ПХЗ, ділянки розвантаження уранової руди, в зоні «історичного» відстійника нижче хвостосховища «Центральний Яр», а також уздовж північної огорожі промислового майданчика ПХЗ (для моніторингу витоків у

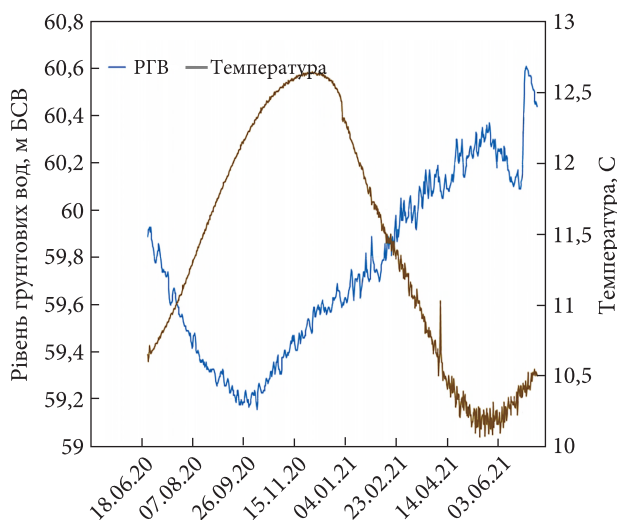


Рис. 3. Графік рівня і температури ґрунтових вод, одержаний за допомогою датчика TD-Diver, по св. 1-2019

Fig. 3. Graph of groundwater level and temperature obtained using the TD-Diver sensor installed to the well No. 1-2019

напрямку р. Коноплянка) (див. рис. 1). Одержані при бурінні дані дозволили уточнити геологічну будову майданчика ПХЗ. Зокрема, вони були використані при побудові геологічного розрізу ПХЗ, наведеного на рис. 2.

За результатами дослідно-фільтраційних робіт методом експрес-наливів, які було виконано на семи свердловинах, коефіцієнт фільтрації (Кф) водоносного горизонту в алювіальних відкладах змінюється від 0,6 до 4,1 м/добу при середньому 1,4 м/добу. Ці значення дещо нижчі від таких, що використовувалися в попередніх дослідженнях з моделювання фільтраційних процесів у зоні ПХЗ (Skalskji et al., 2011; Ткаченко та ін., 2020).

3.3. Спостереження за рівнями ґрунтових вод

У рамках розвитку і модернізації системи моніторингу підземних вод ПХЗ три нові спостережних свердловини в межах різних геоморфологічних елементів території були обладнані автоматичними електронними датчиками температури і тиску води TD-Diver (<https://www.vanessen.com/products/data-loggers/td-diver/>).

Дані спостережень в річному циклі в 2020—2021 рр. по св. 1-2019, що розташована на Північному майданчику ПХЗ у межах першої надзапавної тераси р. Дніпро (глибина до РГВ становить 1—2,5 м), наведені на рис. 3. Річна амплітуда коливань РГВ сягає 1,4 м. Одержані дані про режим підземних вод на цій ділянці загалом узгоджуються з сезонними метеорологічними факторами (літня — осіння межень і наступний підйом РГВ внаслідок осінніх опадів і сніготанення), що свідчить про тісний зв'язок водоносного горизонту з атмосферними чинниками. Досить велика сезонна амплітуда коливань РГВ може вказувати на більшу, ніж вважалося раніше (Skalskji et al., 2011; Ткаченко та ін., 2020), величину річного інфільтраційного живлення водоносного горизонту в алювіальних відкладах у межах Північного майданчика ПХЗ. Цей висновок має попередній характер і потребує підтвердження подальшими спостереженнями.

Дані про розподіл рівнів водоносного горизонту в алювіальних відкладах станом на березень 2021 р. представлені на рис. 4, а. Режим РГВ горизонту в алювіальних відкладах у період 2005—2021 рр. у межах промислового май-

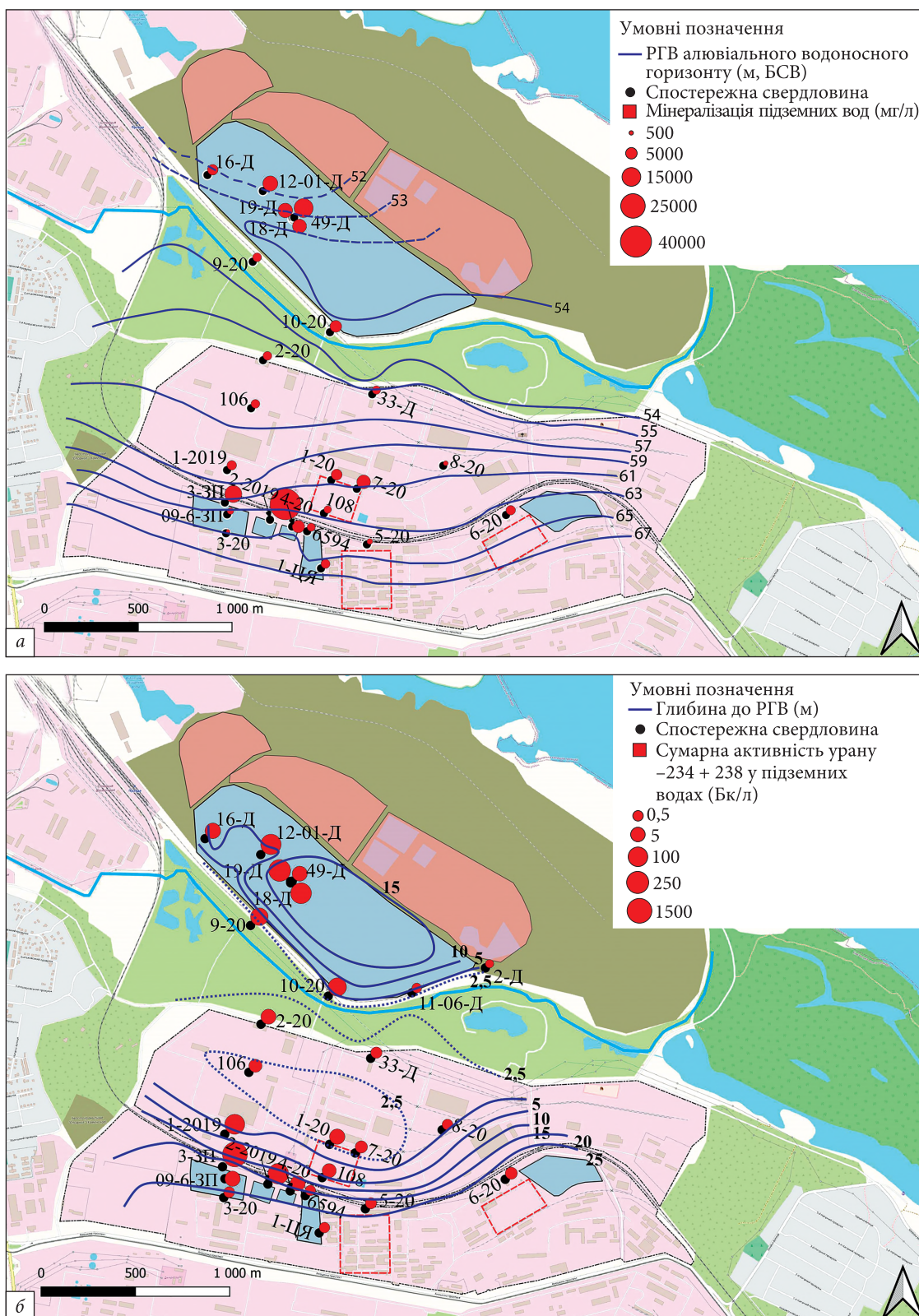


Рис. 4. Дані гідрогеологічного моніторингу ПХЗ (березень 2021 р.): а — двовимірні карта РГВ і розподілу мінералізації підземних вод; б — двовимірні карта глибин РГВ і вмісту урану-234 + 238 в підземних водах

Fig. 4. Hydrogeological monitoring data for the PChP site (March 2021): а — 2-dimensional map of groundwater level and total dissolved solids groundwater; б — 2-dimensional map of groundwater depths and uranium-234 + 238 concentration in groundwater

Таблиця 1. Макро-іонний склад підземних вод та території ПХЗ за даними опробування в березні 2021 р.

Table 1. Major ions concentrations in groundwater at the PChP site based on the survey in March 2021

Номер св. ¹	Сухий залишок, мг/л	рН	Еh, мВ	Катіони, мг/л					Аніони, мг/л			
				Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
<i>Хвостосховище «Дніпровське»</i>												
9-20	5719	6,8	309	587	36,1	561	321	42,6	212	805	2840	309
10-20	3170	6,8	239	256	7,6	331	147	110	85	634	1597	3,08
16-Д	4627	6,8	90	396	10,5	240	333	226	355	537	2346	112
12-1Д	9378	7,2	141	372	32,3	531	1227	23,2	64	1000	6125	3,6
18-Д	8110	6,9	97	401	88,8	591	371	632	35,5	1976	3915	1,6
19-Д	8792	6,7	111	540	34,5	551	495	576	50	2463	3978	2,1
49Д	14961	5,8	244	1370	24,3	551	1118	693	617	268	8507	1205
<i>Профіль від хвостосховища «Західне»</i>												
3-20 ²	585	7,9	376	53,3	4	26,1	57,1	0,6	39	189	182	30
09-6 ЗП	1785	7,8	159	311	1,7	48,1	105	2,6	85,1	605	500	126
3-ЗП	12090	7,2	368	2492	4,7	473	369	2,8	780	3201	2416	2351
1-2019	3745	7,5	372	630	3,5	175	159	76	404	872	990	433
106	3150	7	356	341	25,1	391	97	1,5	106	744	992	449
<i>Профіль від хвостосховища «Центральний Яр»</i>												
1ЦЯ	3435	7,3	329	457	15,4	245	85	227	886	646	545	323
6594	2755	8,6	131	115	13,9	361	107	169	106	122	1755	5,1
108	2335	8,2	341	237	7,3	96,2	210	47,8	369	335	557	476
<i>Ділянка «історичного» відстійника нижче хвостосховища «Центральний Яр»</i>												
1-20	4944	7,4	368	213	8,5	633	405	8,9	500	329	2029	817
7-20	7805	7	364	629	8,5	469	688	169	737	1012	2922	1167
<i>Шламовідстійник № 220</i>												
2-2019	39865	8,4	-123	14280	16,6	55	191	486	21915	2646	270	2,9
<i>Шламовідстійник № 230</i>												
4-20	6450	7	337	580	132	416	112	526	340	610	1741	1990
<i>Ділянка розвантаження уранової руди</i>												
6-20	3685	7,5	391	166	3,4	412	335	9,9	507	809	1118	323
<i>Будівля № 104</i>												
5-20	1335	7,4	428	56	4,9	150	109	1,6	63,8	280	426	239
<i>Будівля № 815</i>												
8-20	992	7,5	39	88,9	3,2	82	70,8	1,7	103	500	120	21,5
<i>Вздовж північної огорожі ПХЗ</i>												
33Д	2905	7,3	231	177	29,8	331	188	19,6	220	500	850	586
2-20	3167	7,1	375	327	12,7	351	135	4,8	99	854	926	458
ГДК ³	1000	6,5—8,5		200	10	130	80	0,5	250		500	50

Примітки: ¹ Дані про належність свердловини до алювіального або техногенного горизонту наведені в табл. 2; ² Св. 3-20 характеризує фонові умови; ³ ГДК (гранична допустима концентрація) згідно СанПіН224-171-10.

Notes: ¹ information on the hydrogeological unit (alluvial or technogenic aquifer) sampled by well is listed in Table 2; ² well 3-20 characterizes background conditions; ³ ГДК = MPC (Maximum Permissible Concentration) according to SanPiN224-171-10.

Таблиця 2. Концентрації радіонуклідів і токсичних металів підземних вод та території ПХЗ за даними опробування в березні 2021 р.

Table 2. Radionuclides and toxic metal concentrations in groundwater at the PChP site based on the survey in March 2021

Номер св.	Горизонт ¹	Радіонукліди, Бк/л ²					Токсичні метали, мг/л ³					
		U-238	U-234	Ra-226	Pb-210	Po-210	Ti	Mn	Ni	As	Hg	Pb
<i>Хвостосховище «Дніпровське»</i>												
9-20	Алюв.	16,3	16,6	0,126	0,52	0,015	— ³	4,4	0,02	0,01	—	—
10-20	Алюв.	11,1	10,4	0,12	0,045	0,015	—	4,95	0,01	—	—	
2-Д	Алюв.	0,05	0,06	0,12	0,63	0,165	—	0,02	—	—	—	
11-06 Д	Техног.	0,12	0,13	0,18	0,44	0,2	—	0,07	0,01	—	0,01	
16-Д	Алюв.	3,8	3,4	0,13	13,7	4,1	—	6,3	0,02	—	—	
12-1Д	Техног.	57,2	54,5	6,4	35,9	0,55	0,04	6,5	0,09	0,16	0,01	
18-Д	Техног.	65,3	73,3	5,6	39,7	0,05	—	3,1	0,05	0,47	0,02	
19-Д	Алюв.	128	129	2,2	20,5	0,6	—	8,1	0,02	0,08	0,01	
49Д	Алюв.	2,6	2,5	0,2	0,6	0,065	—	46,6	0,08	—	—	
<i>Профіль від хвостосховища «Західне»</i>												
3-20 ⁴	Алюв.	0,27	0,22	0,21	0,16	0,05	—	0,01	—	—	—	
09-6 ЗП	Алюв.	3,1	2,95	0,17	1,4	1,1	—	0,3	—	—	—	
3-ЗП	Алюв.	732	675	0,09	3,1	1,3	—	0,1	0,04	—	0,01	
1-2019	Алюв.	46,1	43	0,09	0,045	0,015	0,01	1,4	0,01	—	—	
106	Алюв.	0,8	0,93	0,08	2,2	2,6	0,02	1,0	0,01	—	—	
<i>Профіль від хвостосховища «Центральний Яр»</i>												
1ЦЯ	Алюв.	0,21	0,21	0,095	1,2	0,63	0,01	0,06	—	—	—	
6594	Алюв.	0,18	0,18	0,15	0,13	0,06	—	0,23	0,01	—	—	
108	Алюв.	1,5	1,5	0,14	0,16	0,02	—	0,47	0,01	—	0,01	
<i>Історичний відстійник нижче хвостосховища «Центральний Яр»</i>												
1-20	Алюв.	3,2	3,1	0,13	0,045	0,015	—	0,18	0,03	—	0,01	
7-20	Алюв.	0,48	0,57	0,13	0,03	0,015	0,02	0,77	0,02	—	—	
<i>Шламівідстійник № 220</i>												
2-2019	Алюв.	69,8	57,8	0,17	0,96	0,55	0,12	—	0,17	4,6	—	
<i>Шламівідстійник № 230</i>												
4-20	Алюв.	2,5	2,6	0,25	0,395	0,005	0,04	2,25	0,03	0,07	—	
<i>Ділянка розвантаження уранової руди</i>												
6-20	Алюв.	0,45	0,5	0,12	0,16	0,095	0,01	0,07	—	—	—	
<i>Будівля № 104</i>												
5-20	Алюв.	0,29	0,3	0,095	0,55	0,145	0,01	0,01	—	—	—	
<i>Будівля № 815</i>												
8-20	Алюв.	0,24	0,22	0,17	0,045	0,02	0,01	0,58	—	—	—	
<i>Вздовж північної огорожі ПХЗ</i>												
33Д	Алюв.	0,28	0,34	0,11	0,065	0,012	0,01	0,46	0,01	—	—	
2-20	Алюв.	2,6	2,7	0,07	0,075	0,035	0,02	1,44	0,01	—	—	
ГДК ⁵		1	1	0,5	0,2	0,13	—	0,05	0,02	0,01	0,0005	

Примітки: ¹ Водонесний горизонт: «Алюв.» — алювіальний, «Техног.» — техногенний; ² Аналітична похибка вимірювання U-234/238 — 15—20 %, інші радіонукліди — 20—25 %; ³ Рискою позначені визначення менше МДК (мінімальної детектованої концентрації): Ti, Mn, Ni, As — 0,001 мг/л; Pb — 0,0001 мг/л; Hg — 0,00005 мг/л.; ⁴ Св. 3-20 характеризує фонові умови; ⁵ ГДК (гранична допустима концентрація) згідно СанПіН224-171-10, СанПіН4630-88.

Notes: ¹ Aquifer: Алюв — alluvial, Техн — technogenic; ² analytical measurement error for U-234/238 is 15-20%, for other radionuclides — 20-25%; ³ dashed line indicates measurement results which are below the MDC (minimum detectable concentration) — for Ti, Mn, Ni, As it is 0,001 mg/l, for Pb — 0,0001 mg/l, for Hg — 0,00005 mg/l; ⁴ well 3-20 characterizes the background conditions; ⁵ ГДК = MPC (Maximum permissible concentration) according to SanPiN224-171-10, SanPiN4630-88.

данчика ПХЗ характеризується відносною стабільністю. Спостерігається фільтрація в північному напрямку до р. Коноплянка, що дремує зазначений водоносний горизонт. Однак у північно-західній частині хвостосховища «Дніпровське» починаючи з 2005 р. спостерігається значне (до 3—4 м) пониження РГВ, що, вірогідно, пов'язано з промисловою розробкою і виїманням шламів з відстійників Дніпровського коксохімічного заводу (ДКХЗ), що межують з даною ділянкою.

3.4. Результати моніторингу вмісту радіонуклідів і хімічних елементів у підземних водах по вдосконаленій мережі свердловин

В березні 2021 р. було виконано відбір зразків підземних вод з використанням основних моніторингових свердловин, що раніше існували на території ПХЗ, а також нових свердловин, які були споруджені впродовж 2019—2021 рр. Відібрані зразки були проаналізовані на вміст макро-іонів, радіонуклідів ряду розпаду урану-238 і токсичних металів. Дослідження вмісту токсичних металів включало розширений перелік забруднювачів: V, Cr, Se, Cd, Co, Ti, Mn, Ni, As, Hg, Pb.

Результати аналітичних досліджень представлені в табл. 1 (макро-іони) і 2 (радіонукліди і токсичні метали). При інтерпретації даних таблиць слід брати до уваги, що «фоновий» склад підземних вод характеризує св. 3-20, розташована в Південному секторі ПХЗ вище хвостосховища «Західне».

Дані про вміст основних іонів у підземних водах, наведені в табл. 1, вказують на повсюдне забруднення підземних вод у зоні об'єктів ПХЗ натрієм, хлорид-іоном, сульфат-іоном, амонієм, нітратами та іншими макро-компонентами. Ці дані загалом збігаються з результатами попередніх моніторингових досліджень (Ткаченко та ін., 2020). Дуже високі (навіть екстремальні, сухий залишок — до 40 г/л!) рівні хімічного забруднення (зокрема, Na і Cl іонами) виявлені на ділянці відстійників № 220 і 230. Гідрохімічний склад води в св. 1-2019 відповідає гідрохімічному складу води відстійника № 220 за даними обстеження ТОВ «Екомонітор» (Войцехович и др., 2016). Це підтверджує, що забруднення геологічного середовища на цій ділянці сформовано витоками розчинів із від-

стійників. Найбільш високими рівнями хімічного забруднення характеризується західна частина промислового майданчика і хвостосховище «Дніпровське» (див. рис. 4, а).

Серед радіонуклідів найбільша мобільність в підземних водах притаманна ізотопам урану-238/234 (див. табл. 2). Підвищені концентрації урану в підземних водах спостерігаються в підземних водах у зоні впливу хвостосховищ «Західне» і «Дніпровське». Також високі концентрації цього радіонукліда виявлені на ділянці відстійників № 220 і 230. Концентрації урану з перевищеними фоновими значеннями спостерігаються на ділянці «історичного» відстійника нижче хвостосховища «Центральний Яр» (св. 1—20, 108).

У ряді свердловин виявлені перевищення ГДК для радію-226 (в межах хвостосховища «Дніпровське»). Також в окремих свердловинах відмічаються перевищення ГДК для Po-210 і Pb-210 (як правило, відповідні зразки мають також підвищені концентрації урану (див. табл. 2). Загалом, найбільшими рівнями радіоактивного забруднення (так само як хімічного забруднення) характеризуються західна частина промислового майданчика ПХЗ і хвостосховище «Дніпровське» (див. рис. 4, б).

Дослідження вмісту токсичних металів у підземних водах підтвердили дані попередніх робіт (Ткаченко та ін., 2020) про повсюдне забруднення Mn із значним перевищенням питних нормативів, а також досить часті перевищення ГДК для Ni, а в окремих випадках для Pb. Крім того, в ряді свердловин були ідентифіковані As і Hg в концентраціях, що перевищують питні нормативи. За результатами досліджень концентрації V, Cr, Se, Cd, Co у підземних водах є нижчими за ГДК, тому ці елементи виключені з табл. 2.

4. Висновки

В результаті виконаних досліджень з облаштування та опробування нових гідрогеологічних спостережних свердловин виявлені нові джерела серйозного хімічного і радіоактивного забруднення геологічного середовища на Південному майданчику ПХЗ, зокрема в зоні басейнів відстійників № 220 і 230. Радіоактивне забруднення може бути пов'язано з тим, що, за даними звітів ТОВ «Екомонітор» (Войцехович и др.,

2016) і свідченнями колишніх співробітників ПХЗ (усні повідомлення В. Литвиненка та Л. Царенка), в період функціонування підприємства ці споруди використовували в якості буферних ємностей для технологічних розчинів вилуговування урану та інших відходів, для повторного застосування рідини в виробничому циклі та/або перед направленням відходів на хвостосховища ПХЗ. Також на цій ділянці мали місце числені розливи технологічних розчинів з напірних пульпопроводів. Інфільтрація радіоактивно і хімічно забруднених технологічних розчинів в експлуатаційний період ПХЗ, вірогідно, сформувала забруднення підземних вод, що фіксується в теперішній час.

На Північному майданчику виявлено радіоактивне забруднення підземних вод з перевищенням фонових рівнів на ділянці «історичного» відстійника нижче хвостосховища «Центральний Яр». Що сталося з цим відстійником, не відомо (або свого часу його було перекрито зверху ґрунтовим екраном і законсервовано, або відходи були перенесені на інше хвостосховище). Ця ділянка ПХЗ потребує додаткового обстеження.

Як вже зазначалося, на підставі обстеження виявлено, що основні джерела техногенного забруднення підземних вод зосереджені в західній частині промислового майданчика ПХЗ (хвостосховище «Західне», відстійники № 220 і 230). Відносно низькі рівні забруднення ґрунтових вод у зоні впливу ділянок забруднених ґрунтів у центральній і східній частинах Південного майданчика (комплекс радіохімічних цехів, ділянка розвантаження уранової руди) зумовлені наявністю потужної (20—25 м) зони аерації (див. рис. 4, б) і тим, що тут не відбувалися скиди рідких радіоактивно забруднених розчинів (відходи у хвостосховище «Південно-східне» завантажувалися у сухий спосіб; те ж саме стосується розташованої поруч ділянки розвантаження уранової руди із залізниці).

Обстеження підтвердило, що серед радіонуклідів найбільша мобільність в підземних водах притаманна ізотопам урану-238/234, сумарна концентрація ізотопів якого в алювіальному горизонті в зоні хвостосховища «Західне» сягала 1377 Бк/л (U-238+234). Застосовані більш досконалі методики консервації та аналітичного визначення Ra-226, Po-210 і Pb-210 виявили дещо вищі рівні забруднення підзем-

них вод цими елементами порівняно з попередніми аналогічними дослідженнями (Ткаченко та ін., 2020), з перевищенням ГДК для цих радіонуклідів у ряді свердловин. Зазначимо також, що на додаток до відомих хімічних токсикантів (Mn, Ni, Pb) у результаті проведених моніторингових робіт виявлено забруднення підземних вод у зоні впливу об'єктів ПХЗ миш'яком і ртуттю.

Таким чином, забруднення підземних вод на промислового майданчику ПХЗ формується під впливом більшої кількості техногенних джерел спадщини уранового виробництва, ніж вважалося раніше. Виявлені нові джерела забруднення потребують додаткового обстеження і врахування його результатів при прогнозуванні довгострокових впливів майданчика ПХЗ на геологічне середовище і поверхневу водну систему р. Коноплянка—р. Дніпро.

Передбачено, що новостворені свердловини будуть залучені ДП «Бар'єр» до мережі режимних гідрогеологічних спостережень в межах впливу об'єктів спадщини уранового виробництва ПХЗ. Поточний регламент моніторингу території ПХЗ передбачає проведення режимних гідрогеологічних спостережень (рівні підземних вод, хімічний і радіаційний склад підземних вод) з періодичністю 1 раз на рік. Зазначимо, що мережа моніторингу підземних вод ПХЗ у подальшому має реконструюватися і розширюватися у міру виконання робіт з ремедіації окремих об'єктів. Зокрема, «дорожня карта» ремедіації ПХЗ (Facilia AB, 2015) передбачає створення (або реконструкцію) інженерних ґрунтових екранів на хвостосховищах «Західне», «Центральний Яр» та «Дніпровське». Такі роботи вимагатимуть перепланування об'єктних мереж свердловин для моніторингу підземних вод, розташованих у межах відповідних хвостосховищ. Нововиявлені джерела забруднення ґрунтових вод у межах майданчика ПХЗ в майбутньому мають бути обладнані створами свердловин нижче за потіком підземних вод для дослідження стану гідрогеологічного середовища на відповідних ділянках і прогнозування розвитку ореолів забруднення.

Облаштування нових моніторингових свердловин і аналітичні дослідження зразків води виконано в рамках гранту технічної допомоги

Норвезького агентства радіаційного захисту для ДП «Бар'єр» проект № 6181269 «Зменшення ризику та вдосконалення системи моніторингу на майданчику ПХЗ, Україна». Аналіз одержаних даних проведено в рамках бюджетної

теми Інституту геологічних наук НАН України III-11-20 «Моніторинг, прогнозування і оцінка ризиків небезпечних гідрогеологічних процесів у складних природно-техногенних й інженерних умовах».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Бахур А.Е., Мануилова Л.И., Зуев Д.М., Иванова Т.М., Трухина Т.П. Методика выполнения измерений объемной активности изотопов урана (234, 238) в пробах природных вод альфа-спектрометрическим методом с радиохимическим выделением. Свидетельство ЦММИ ГНМЦ ВНИИФТРИ Госстандарта РФ № 49090.3Н628. Свидетельство НСАМ № 381-ЯФ. Москва ВИМС, 2003. 19 с.
- Бахур А.Е., Мануилова Л.И. Изотопный анализ урана — новые методические решения. АНРИ. 2007. № 3 (50). С. 32—35.
- Бахур А.Е., Мануилова Л.И., Овсянникова Т.М. Po-210 и Pb-210 в объектах окружающей среды. Методы определения. АНРИ. 2009. № 1 (56). С. 29—40.
- Бугай Д.А., Скальський А.С., Авила Р. Моделирование миграции радионуклидов уранового ряда из хвостохранилища «Днепровское» (г. Днепропетровск) в подземные воды и р. Днепр. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2008. № 6. С. 39—45.
- Бугай Д.О., Ткаченко Ю.В., Заноз Б.Ю. Концепція реконструкції та розвитку системи моніторингу підземних вод промислового майданчика Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське). *Гідрогеологія: наука, освіта, практика*. Зб. наук. пр. Харків, 2020. Вип. 2. С. 12—17.
- Войцехович О.В., Лаврова Т.В., Канівець В.В., Тодосієнко С.В., Соколов С.Б., Деркач Г.А., Кориченський К.А., Лаптев Г.В., Осадчая Н.Н. Изучение радиоактивного загрязнения и химического состава материалов в отстойниках 220 и 230 на территории бывшего ПО «Приднепровский химический завод» (ПХЗ, Днепропетровск). Отчет по Задаче 1.6 Проекта: U4.01/10G, Development of the method for the remediation activities at the former uranium facility “Pridneprovskiy Chemical Plant”, Contract No. NSI/291-798, Addendum 1 “Immediate Action to Improve the Situation at the Pridneprovsky Chemical Plant”. Киев: ООО «Экомонитор», 2016. 42 с.
- Кузовов Ю.И. Приднепровский химический завод (исторический очерк). Днепропетровск: Полиграфист, 1997. 160 с.
- Методичні вказівки. Радіаційний контроль. Радон-222, радій-226, радій-228 та уран. Вода артезіанських свердловин. Відбір та підготовка, аналіз та гігієнічна оцінка. Київ, 2005. 33 с. URL: http://c14.kiev.ua/pdf/2005_Rn_Ra_U_water_method.pdf (Дата звернення: 20.10.2021)
- Процак В.П., Кашипаров В.О., Кириченко В.К., Колябіна І.Л., Марініч О.В., Малоштан І.М., Левчук С.Є., Прокопчук Н.М. Оцінка параметрів міграції радіонуклідів уранового ряду у хвостосховищах Придніпровського хімічного заводу. *Ядерна фізика та атомна енергетика*. 2013. Т. 14, № 1. С. 55—63.
- Ткаченко К.Ю., Скальський О.С., Бугай Д.О., Лаврова Т.В., Процак В.П., Кубко Ю.І., Авіла Р., Заноз Б.Ю. Моніторинг техногенного забруднення підземних і поверхневих вод у зоні впливу уранових хвостосховищ Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське). *Геол. журн.* 2020. № 3 (372). С. 17—35. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.3.206341>
- Bouwer H., Rice R.C. A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resour. Res.* 1976. Vol. 12, No. 3. P. 423-428.
- Bugai D.O., Laptev G.V., Skalskyi O.S., Lavrova T.V., Avila R. Analysis of spatial distribution and inventory of radioactivity within the uranium mill tailings impoundment. *Ядерна фізика та атомна енергетика*. 2015. Т. 16, № 3. С. 254—261. <https://doi.org/10.15407/jnpae2015.03.254>
- Dinis M.d.L., Fiúza A. Mitigation of Uranium Mining Impacts—A Review on Groundwater Remediation Technologies. *Geosciences*. 2021. Vol. 11 (6). P. 250. <https://doi.org/10.3390/geosciences11060250>
- Facilia AB. Development of the method (strategy, technology) for the remediation activities at the former uranium facility “Pridneprovskiy Chemical Plant”. Report on INSC Project U4.01/10G Task 2. Analysis of the situ at the PChP site (Team leader R. Zurl). Contract No. NSI/291-798 Implemented by the Consortium Facilia AB, WISUTEC GmbH, WISMUT GmbH, C&E GmbH, 2015.
- Hu Q.H., Weng J.Q., Wang J.S. Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review. *J. Environ. Radioact.* 2010, Vol. 101 (6). P. 426-37. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.08.004>
- IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 18. Worldwide Open Proficiency Test: Determination of Naturally Occurring Radionuclides in Phosphogypsum and Water, IAEA-CU-2008-03. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
- Korychenskyi K.O., Laptev G.V., Voitsekhovych O.V., Lavrova T.V., Dyvak T.I. Speciation and mobility of uranium in tailings materials at the U-production legacy site in Ukraine. *Ядерна фізика та енергетика*. 2018. Т. 19. С. 270—279. <https://doi.org/10.15407/jnpae2018.03.270>

- Lavrova T., Voitsekhovych O. Radioecological assessment and remediation planning at the former uranium milling facilities at the Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine. *J. Environ. Radioact.* 2013. Vol. 115. P. 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.06.011>
- NEA (Nuclear Energy Agency). Managing Environmental and Health Impacts from Uranium Mining. No. 7062. OECD: Paris, France, 2014.
- Romanchuk A., Vlasova I., Kalmykov S. Speciation of Uranium and Plutonium from Nuclear Legacy Sites to the Environment: A Mini Review. *Frontiers in Chemistry.* 2020. Vol. 8. P. 630. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00630>
- Skalskji O., Bugai D., Voitsekhovych O., Ryazantsev V., Avila R. Groundwater monitoring data and screening radionuclide transport modeling analyses for the uranium mill tailings at the Pridneprovsky Chemical Plant Site (Dneprodzerzhinsk, Ukraine). In: Merkel B., Schipek M. (Eds.), *The New Uranium Mining Boom. Challenge and lessons learned.* Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer 2011. P. 219-228. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22122-4>

Надійшла до редакції 14.09.2021
Надійшла у ревізованій формі 02.11.2021
Прийнята 02.11.2021

REFERENCES

- Bakhur, A.E., Manuilova, L.I., Zuev, D.M., Ivanova, T.M., Trukhina, T.P. (2003). A technique for measuring the volumetric activity of uranium isotopes (234, 238) in natural water samples by the alpha spectrometric method with radiochemical separation. Copyright certificate of the State Standard Committee of the Russian Federation № 49090.3H628. Moscow: VIMS, 19 p.
- Bakhur, A.E., Manuilova, L.I. (2007). Uranium isotope analysis — new methodological solutions. *ANRI*, 3 (50), 32-35 (in Russian).
- Bakhur, A.E., Manuilova, L.I., Ovsyannikova, T.M. (2009). Po-210 and Pb-210 in environmental objects. Determination methods. *ANRI*, 1 (56), 29-40 (in Russian).
- Bouwer, H., Rice, R.C. (1976). A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resour. Res.*, 12, 3, 23-428.
- Bugai, D.A., Skalskyy, A.S., Avila R. (2008). Modeling of the migration of uranium series radionuclides from the Dneprovskoe tailing (Dneprodzerzhinsk) to groundwater and the Dnieper River. *Environmental studies and life safety*, 6, 39-45 (in Russian).
- Bugai, D.O., Laptev, G.V., Skalskyy, O.S., Lavrova, T.V., Avila R. (2015). Analysis of spatial distribution and inventory of radioactivity within the uranium mill tailings impoundment. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 16, 3, 254-261. <https://doi.org/10.15407/jnpae2015.03.254>
- Bugai, D.O., Tkachenko, Yu.V., Zanoz, B.Yu. (2020). The concept of reconstruction and development of the groundwater monitoring system of the industrial site of the Pridneprovsky Chemical Plant (Kamyanske). *Hydrogeology: science, education, practice. Collection of scientific works. Issue 2.* Kharkiv, pp. 12-17 (in Ukrainian).
- Dinis, M.d.L., Fiúza, A. (2021). Mitigation of Uranium Mining Impacts—A Review on Groundwater Remediation Technologies. *Geosciences*, 11 (6), 250. <https://doi.org/10.3390/geosciences11060250>
- Facilia AB. Development of the method (strategy, technology) for the remediation activities at the former uranium facility “Pridneprovskiy Chemical Plant”. Report on INSC Project U4.01/10G Task 2. Analysis of the situ at the PChP site (Team leader R. Zurl). Contract No. NSI/291-798 Implemented by the Consortium Facilia AB, WISUTEC GmbH, WISMUT GmbH, C&E GmbH, 2015.
- Hu, Q.H., Weng, J.Q., Wang, J.S. (2010) Sources of anthropogenic radionuclides in the environment: a review. *J. Environ. Radioact.*, 101 (6), 426-37. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.08.004>
- IAEA Analytical Quality in Nuclear Applications Series No. 18. (2010). Worldwide Open Proficiency Test: Determination of Naturally Occurring Radionuclides in Phosphogypsum and Water, IAEA-CU-2008-03. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Korychenskyi, K.O., Laptev, G.V., Voitsekhovych, O.V., Lavrova, T.V., Dyvak, T.I. (2018). Speciation and mobility of uranium in tailings materials at the U-production legacy site in Ukraine. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 19, 270-279. <https://doi.org/10.15407/jnpae2018.03.270>
- Kuzovov, Yu.I. (1997). Pridneprovskiy Chemical Plant (historical review). Dnepropetrovsk: Poligrafist (in Russian).
- Lavrova, T., Voitsekhovych, O. (2013). Radioecological assessment and remediation planning at the former uranium milling facilities at the Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine. *J. Environ. Radioact.*, 115, 118-123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.06.011>
- Methodical instructions. (2005). Radiation control. Radon-222, radium-226, radium-228 and uranium. Water of artesian wells. Selection and preparation, analysis and hygienic assessment. Kyiv. Retrieved from: http://c14.kiev.ua/pdf/2005_Rn_Ra_U_water_method.pdf (in Ukrainian).
- NEA (Nuclear Energy Agency). (2014). Managing Environmental and Health Impacts from Uranium Mining. No. 7062. OECD: Paris, France.

- Protsak, V.P., Kashparov, V.O., Kirichenko, V.K., Kalyabina, I.L., Marinich, O.V., Maloshtan, I.M., Levchuk, S.E., Prokopchuk, N.M. (2013). Evaluation of the parameters of migration of the uranium series radionuclides in the tailings of the Pridneprovskiy chemical plant. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 14 (1), 55-63 (in Ukrainian).
- Romanchuk, A., Vlasova, I., Kalmykov, S. (2020). Speciation of Uranium and Plutonium from Nuclear Legacy Sites to the Environment: A Mini Review. *Frontiers in Chemistry*, 8, 630. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00630>
- Skalskji, O., Bugai, D., Voitsekhovych, O., Ryazantsev, V., Avila, R. (2011). Groundwater monitoring data and screening radionuclide transport modeling analyses for the uranium mill tailings at the Pridneprovsky Chemical Plant Site (Dneprodzerzhinsk, Ukraine). In: Merkel B., Schipek M. (Eds.), *The New Uranium Mining Boom. Challenge and lessons learned*. Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 219-228. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22122-4>
- Tkachenko, E., Skalskyu, A., Bugai, D., Lavrova, T., Protsak, V., Kubko, Yu., Avila, R., Zanoz, B.Yu. (2020). Monitoring of technogenic contamination of groundwater and surface water in the zone of influence of uranium tailings of the Pridneprovsky Chemical Plant (Kamyanske). *Geologičnij žurnal*, 3 (372), 17-35. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.3.206341> (in Ukrainian).

Received 14.09.2021

Received in revised form 02.11.2021

Accepted 02.11.2021

D.O. Bugai^{1*}, B.Yu. Zanoz¹, T.V. Lavrova², K.O. Korychensky², Yu.I. Kubko¹, R. Avila³, Yu.M. Rets⁴

¹ Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: dmitri.bugai@gmail.com; bzanoz@gmail.com; yury.kubko@gmail.com

² Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: lavrova@uhmi.org.ua; korychenskyi@gmail.com

³ AFRY, Stockholm, Sweden

E-mail: rodolfo.avila@afry.com

⁴ Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

E-mail: smsgv1978@gmail.com

* Corresponding author

DEVELOPMENT OF THE GROUNDWATER MONITORING SYSTEM IN THE ZONE OF INFLUENCE OF URANIUM PRODUCTION LEGACY FACILITIES OF THE PRYDNIPROVSKY CHEMICAL PLANT

The results of works on reconstruction and development of the hydrogeological monitoring system at the Prydniprovsky Chemical Plant site, Kamyanske (PChP) and on the groundwater survey using the improved observation wells network are presented (first such survey since 2016). During the works, geology structure of the site was précised, hydraulic testing was carried out, and groundwater was sampled at a number of uranium production legacy objects that have not been previously covered by observations. Automated monitoring of groundwater levels (GWL) has been started. As a result, new information on the seasonal dynamics of GWL was obtained. New sources of serious chemical and radioactive contamination of the geological environment are identified at the Southern PChP site, in particular in the area of settling basins № 220 and 230. Radioactive contamination of groundwater with excess of background levels is also observed also in the zone of “historic” settling pond situated below the “Central Yar” uranium tailings. In addition to previously known chemical toxicants (Mn, Ni, Pb), the monitoring study revealed groundwater contamination by arsenic and mercury in the areas affected by the PChP facilities. Thus, groundwater contamination at the PChP industrial site is formed under the influence of more man-made legacy sources than previously thought. The identified new sources of pollution deserve additional characterization and consideration when predicting the long-term impacts of the PChP site on the surface water system of the Konoplyanka River—Dnieper River.

Keywords: Prydniprovsky Chemical Plant; hydrogeological monitoring; groundwater pollution; uranium production legacy site.