

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОДООБМІНУ І МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ЗОНІ ВПЛИВУ УРАНОВОГО ХВОСТОСХОВИЩА «ЗАХІДНЕ» ПРИДНІПРОВСЬКОГО ХІМІЧНОГО ЗАВОДУ**DETERMINATION OF PARAMETERS OF WATER EXCHANGE AND MODELLING OF GROUNDWATER FLOW PROCESS FOR URANIUM MILL TAILINGS “ZAHIDNE” OF THE PRYDNIPROVSKY CHEMICAL PLANT****Б. Ю. Заноз, Д. О. Бугай**
Bohdan Yu. Zanoz, Dmytro O. BugaiInstitute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601
(bzanoz@gmail.com, dmitri.bugay@gmail.com)

Представлені результати польових гідрогеологічних досліджень з визначення параметрів водообміну і прогнозного моделювання геофільтраційних процесів у зоні впливу уранового хвостосховища «Західне», що належить до Придніпровського хімічного заводу, м. Кам'янське. Виконані гідрогеологічні спостереження дозволили уточнити інфільтраційне живлення підземних вод досліджуваної ділянки в межах першої тераси (200 мм/рік) і другої тераси (150 мм/рік) р. Дніпро. На основі трасерного експерименту дійсна швидкість фільтрації підземних вод у безнапірному водоносному горизонті в піщаних алювіальних відкладах у зоні впливу хвостосховища оцінена в 0,26–0,52 м/добу. Визначені параметри водообміну і дані моніторингу рівнів підземних вод були використані для побудови і калібрування моделі геофільтраційних процесів на ділянці між хвостосховищем «Західне» і р. Коноплянка на основі програми Visual Modflow. Час фільтрації підземних вод у безнапірному водоносному горизонті від хвостосховища до р. Коноплянка оцінюється на відкаліброваній моделі в 13 років, що помітно менше, ніж попередні оцінки на регіональній фільтраційній моделі (20 років). Були змодельовані кілька сценаріїв ремедіаційних заходів, що дозволило обґрунтувати рекомендації щодо поліпшення захисту підземних і поверхневих вод від радіоактивного забруднення.

Ключові слова: підземні води, інфільтраційне живлення, трасерний експеримент, гідрогеологічне моделювання, Придніпровський хімічний завод.

Results are presented of field hydrogeological studies aimed at determining the parameters of water exchange and modelling predictions of groundwater flow processes in the zone of influence of the “Zahidne” uranium mill tailing situated at the Prydniprovsky Chemical Plant, Kamianske. Hydrogeological observations allowed to estimate the infiltration recharge rate to groundwater at the study site within the first terrace (200 mm/year) and within the second terrace (150 mm/year) of the Dnipro River. According to tracer test the real groundwater flow velocity in the unconfined aquifer in sandy alluvial deposits in the zone of influence of the tailing is estimated at 0.26–0.52 m/day. Determined water exchange parameters and groundwater level monitoring data were used to develop using Visual Modflow software and calibrate the groundwater flow model for the area between the “Zahidne” uranium mill tailing and Konoplyanka River. Groundwater travel time in the unconfined aquifer from uranium mill tailing to Konoplyanka River estimated using calibrated model is 13 years, which is significantly less than the previous estimates on regional groundwater flow model (20 years). Several remediation scenarios were modelled, which allowed to develop recommendations on improving the protection of groundwater and surface water from radioactive contamination.

Keywords: groundwater, groundwater recharge rate, tracer test, hydrogeological modeling, Prydniprovsky Chemical Plant.

ВСТУП

В статті представлені результати польових гідрогеологічних досліджень і прогнозного моделювання геофільтраційних процесів для уранового хвостосховища «Західне», яке належить до інфра-

структурних об'єктів колишнього виробничого об'єднання (ВО) «Придніпровський хімічний завод» (ПХЗ), м. Кам'янське. ВО ПХЗ був одним із ключових підприємств, де вироблялась уранова сировина для ядерної програми колишнього СРСР,

Цитування: Заноз Б. Ю. Визначення параметрів водообміну і моделювання геофільтраційних процесів в зоні впливу уранового хвостосховища «Західне» Придніпровського хімічного заводу. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2023. Том 16, вип. 1. С. 98–110. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.291210>.

Citation: Zanoz B. Yu., 2023. Determination of parameters of water exchange and modelling of groundwater flow process for uranium mill tailings “Zahidne” of the Prydniprovsky Chemical plant. Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 16, iss. 1. Pp. 98–110. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2023.291210>.

а також функціонувала низка супутніх хімічних підприємств (Кузовов, 1997). В останні десятиліття в рамках національних цільових екологічних програм і проєктів міжнародної технічної допомоги ЄС реалізуються заходи щодо ремедіації радіоактивно-забрудненого промислового майданчика, хвостосховищ, ставків-відстійників та інших об'єктів інфраструктури ПХЗ (Lavrova, Voitsekhoynch, 2013; Tkachenko, 2020).

Хвостосховище «Західне» є одним з найбільш серйозних джерел радіоактивного і хімічного забруднення підземних вод у межах промислового майданчика ПХЗ (Ткаченко та ін., 2020; Бугай та ін., 2021; Заноз та ін., 2021; Лаврова, 2022). Для обґрунтування стратегії з приведення хвостосховища «Західне» в екологічно-безпечний стан необхідно розуміння довгострокових ризиків для довкілля і людини, обумовлених витокami радіоактивних забруднювачів із хвостосховища, та оцінка впливу альтернативних варіантів ремедіаційних заходів на геоміграційні процеси.

Важливою передумовою для прогнозування довгострокових впливів забруднювачів на підземні води є характеристика (на основі експериментальних робіт, моделювання) гідродинамічних умов у зоні впливу хвостосховища. Попередні гідрологічні прогнози для хвостосховища «Західне» були виконані в роботі (Skalski et al., 2011). При цьому для фільтраційних розрахунків була використана планова регіональна модель території ПХЗ. За останні роки були одержані нові дані про геологічну будову досліджуваної ділянки і моніторингові дані про режим рівня ґрунтових вод (РГВ) і забруднення підземних вод (Ткаченко та ін., 2020; Бугай та ін., 2021; Лаврова, 2022). Гідрофізичними і гідрохімічними балансовими методами була оцінена інтенсивність витоку забруднених порових розчинів із тіла хвостосховища (Заноз та ін., 2021).

В 2020 р. за участі авторів статті були розпочаті автоматизовані спостереження за РГВ у межах досліджуваної ділянки. Одержані за допомогою автоматичних датчиків детальні дані моніторингу РГВ за 2020–2023 рр. дозволили нам у цій роботі уточнити інфільтраційне живлення підземних вод у зоні ПХЗ. Інтерпретація даних трасерного експерименту дала можливість оцінити швидкість фільтрації підземних вод у безнапірному водоносному горизонті в зоні впливу хвостосховища. Таким чином, метою даної роботи є побудова і калібрування моделі геофільтраційних процесів на ділянці між хвостосховищем «Західне» і р. Коноплянка на

основі програми Visual Modflow з використанням описаних вище нових даних гідрологічного моніторингу та уточнених оцінок параметрів водообміну. Модель була застосована для прогнозування гідродинамічних умов досліджуваної ділянки, включаючи сценарії реалізації ремедіаційних заходів (облаштування покращеного ґрунтового екрана, вилучення хвостів, тощо). Відповідні результати представлені нижче в статті.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Опис техногенних і гідрологічних умов хвостосховища «Західне»

Техногенні умови хвостосховища «Західне» охарактеризовані за даними робіт (Процак та ін., 2013; Bugai et al., 2015; Tkachenko et al., 2020; Бугай та ін., 2021; Заноз та ін., 2022). Хвостосховище «Західне» було введено в експлуатацію в 1949 р. на ранньому етапі функціонування ПХЗ і експлуатувалося по 1954 р. Хвостосховище було облаштовано в відпрацьованому глиняному кар'єрі на краю другої надзапавної тераси р. Дніпро на Південному майданчику ПХЗ (рис. 1). Його площа становить близько 40 тис. м². З боку першої тераси р. Дніпро чаша хвостосховища була огорожена ґрунтовою дамбою. Відходи вилуговування урану з руди направлялись на хвостосховище як у сухому стані конвеєром (у перші роки функціонування), так і у вигляді пульпи трубопроводами (в подальший період). Товщина шару уранових хвостів у межах об'єкта змінюється від 1 до 12,5 м. Їх загальний об'єм оцінюється в 250 тис. м³. У 2000 р. в північній частині хвостосховища було облаштоване захисне ґрунтове покриття із суглинків (потужністю 1,0–2,8 м) і було обладнано систему дренажних канавок для відводу дощового стоку. Південна частина хвостосховища використовувалася в господарських цілях і була вкрита асфальтом. Дані про радіаційні і геохімічні умови хвостосховища наведені в роботах (Процак та ін., 2013; Bugai et al., 2015; Заноз та ін., 2021).

Геологічний розріз ділянки, де розташоване хвостосховище «Західне», складений породами докембрійського та четвертинного віку (рис. 2). Гідрологічні умови характеризуються наявністю водоносних горизонтів у техногенних відкладах (обводнені хвости в тілі хвостосховища – водоносний горизонт типу «верховодка») та в алювіальних піщаних відкладах і верхній частині підстилаючих їх кристалічних порід з ко-

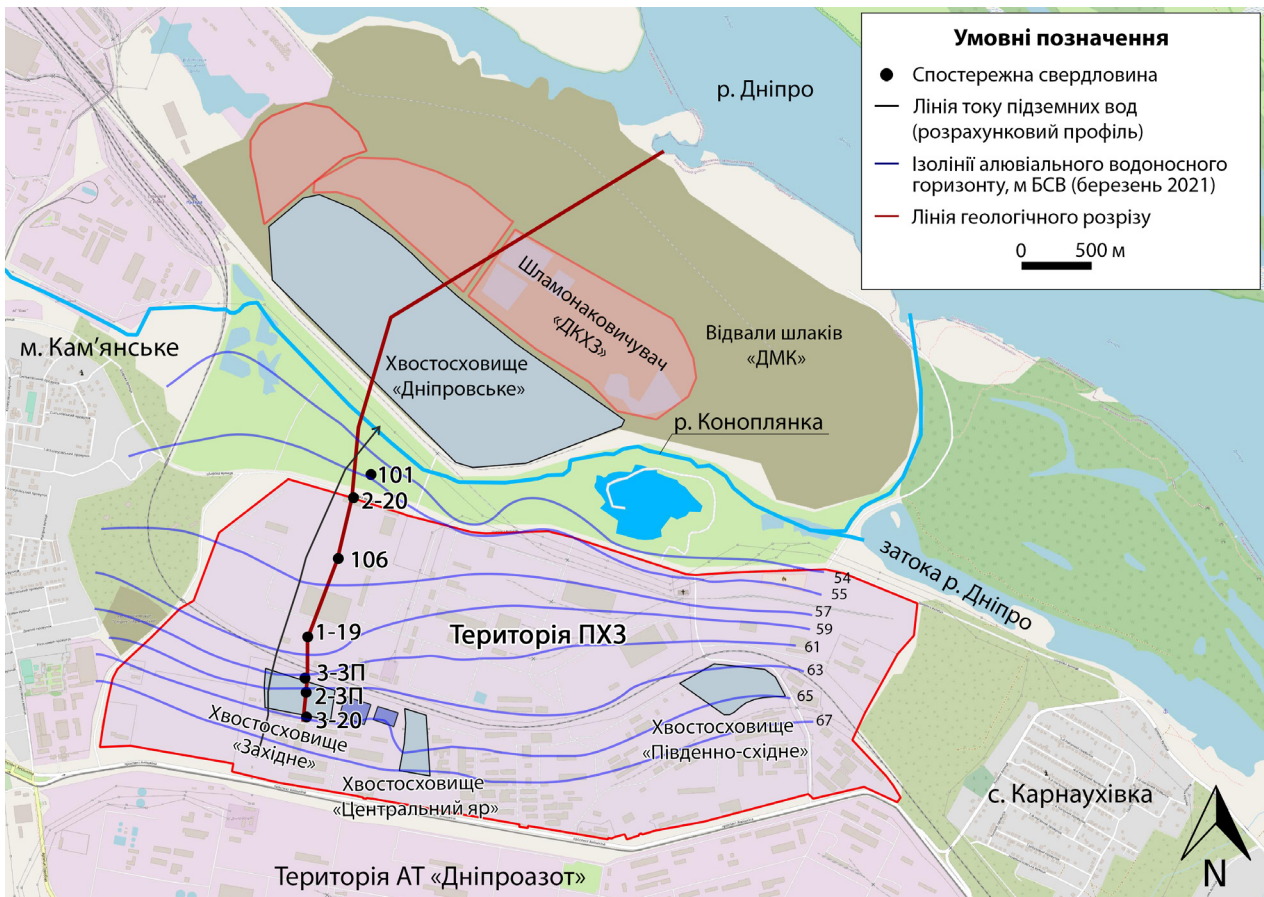


Рис. 1. Карта-схема території ПХЗ з розташуванням хвостосховища «Західне».

Fig. 1. Schematic map of the territory of the Prydniprovsky Chemical Plant with the location of the “Zahidne” uranium mill tailings.

рою вивітрювання. Більш докладно геологічна будова і гідрогеологічні умови об'єкта досліджень описані в працях (Skalskij et al., 2011; Ткаченко та ін., 2020).

Алювіальний водоносний горизонт у зоні впливу хвостосховища «Західне» зазнав значного впливу внаслідок інфільтрації забруднених порових розчинів із тіла хвостосховища (Ткаченко та ін., 2020; Бугай та ін., 2021; Лаврова та ін., 2022). Хвостосховище є джерелом забруднення ґрунтових вод ізотопами урану (уран-238, -234), макроіонами (сульфат-іон, магній, нітрати, амоній), а також токсичними металами (марганець, свинець) із значним перевищенням граничних допустимих концентрацій (ГДК) для питної води.

Підземні води, що фільтруються від хвостосховища «Західне», розвантажуються

в р. Коноплянка, яка тече на відстані 1 км на північ від об'єкта і згодом впадає в р. Дніпро (див. рис. 1).

Методи оцінки інфільтраційного живлення підземних вод

Інфільтраційне живлення підземних вод у межах досліджуваної ділянки було оцінене із застосуванням методу аналізу коливань РГВ у спостережних свердловинах (water table fluctuation method – WTF) (Helay, Cook, 2002). Була використана модифікація методу MRC (master recession curve) (Gumiła-Kawęcka et al., 2022). Ця модифікація WTF, на відміну від стандартного варіанту методу, враховує, що швидкості рецесії РГВ ($\Delta H/\Delta t$) не є константою, а залежать від значення рівня підземної води (H), зменшуючись із зниженням H .

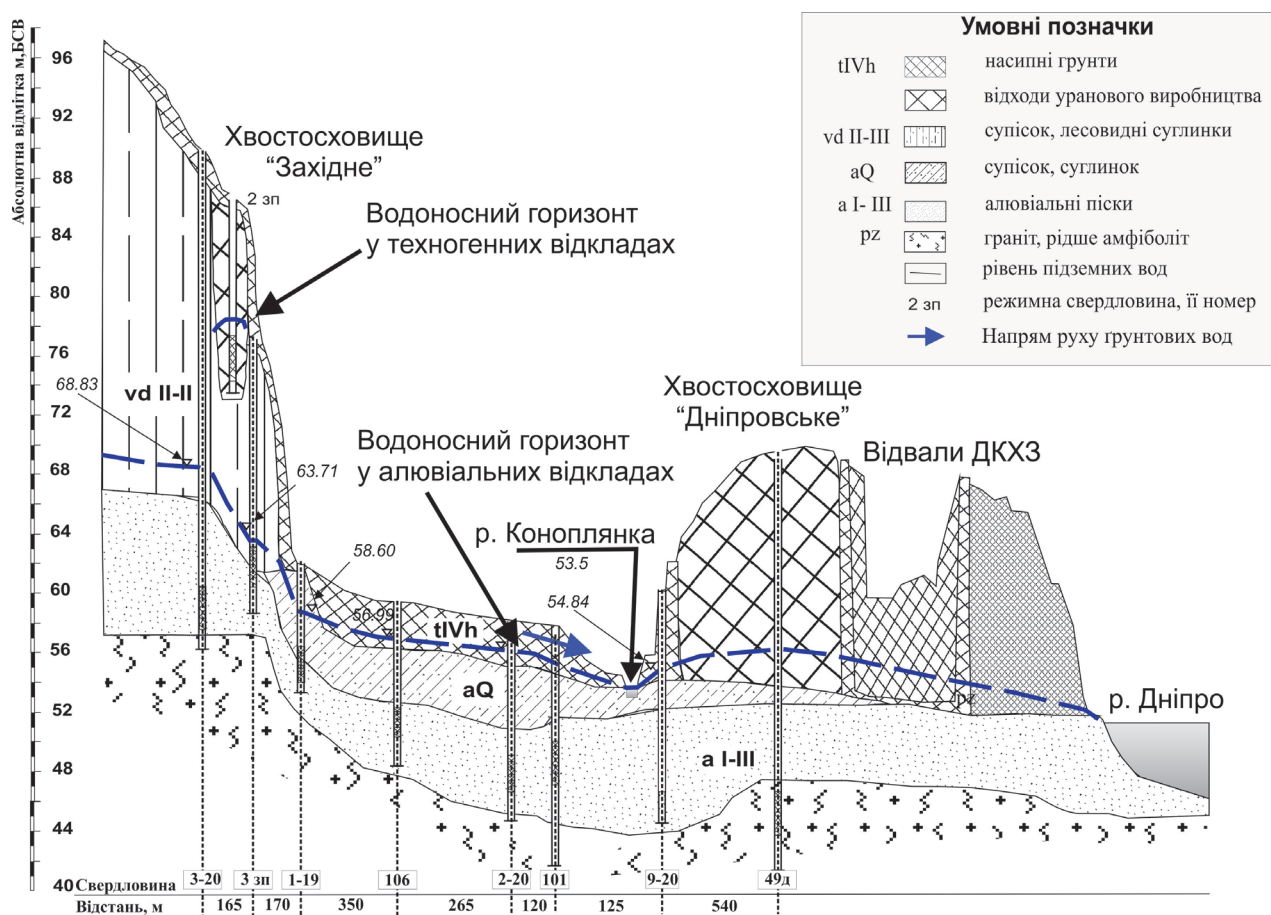


Рис. 2. Геолого-гідрогеологічний розріз по лінії х/х «Західне» – р. Коноплянка. Лінія розрізу показана на рис. 1.

Fig. 2. Geological-hydrogeological cross-section along the line “Zahidne” uranium mill tailing – Konoplyanka River. The section line is shown in Fig. 1.

При розрахунках були використані дані автоматизованих спостережень за РГВ на території ПХЗ з періодичністю 2 рази на добу, одержані в 2020–2023 рр. за допомогою електронних п’єзометричних датчиків TD-Diver (Van Essen Instruments, Нідерланди) (<https://www.vanessen.com/products/data-loggers/td-diver/>). Зокрема, такими датчиками були обладнані свердловини № 1–19 (в межах першої тераси) і № 3–20 (друга тераса), пробурені на створі спостережних свердловин у зоні впливу хвостосховища «Західне» (Бугай та ін., 2021).

Трасерний експеримент для визначення швидкості фільтрації підземних вод

Експериментальний підхід до визначення швидкості фільтрації підземних вод за допомогою трасерного експерименту заснований на введенні індикатора (трасера) в свердловину, з подальшим спостереженням за зниженням концентрації

індикатора в часі внаслідок розбавлення потоком підземних вод через свердловину. Швидкість зменшення концентрації індикатора використовується для визначення швидкості потоку підземних вод через екран свердловини та розрахунку відповідної дійсної швидкості фільтрації потоку підземних вод у водоносному горизонті (Чураєв, Ільїн, 1967).

При проведенні експерименту зона циркуляції та розбавлення трасера в свердловині ізолювалася за допомогою пакера, встановленого в зоні фільтра свердловини (це дозволяє зменшити об’єм циркуляції індикатора та термін проведення досліду). Циркуляція води і гомогенізація трасера в об’ємі пакера забезпечувалася за допомогою перистальтичного насоса (рис. 3). В якості трасера використовувався розчин родаміну. Концентрацію родаміну вимірювали за допомогою портативного флуориметра моделі 10-AU-005-CE (“Turner Design Instruments”, США).

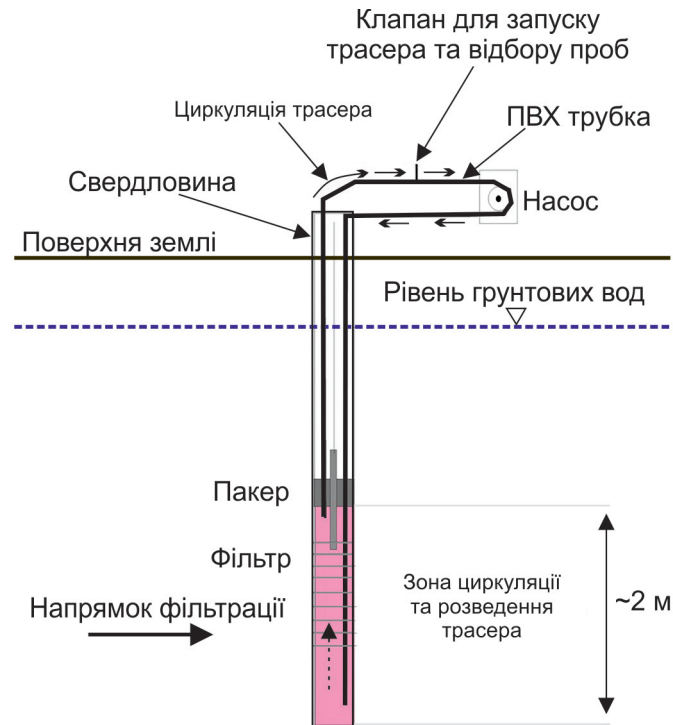


Рис. 3. Схема трасерного експерименту для визначення швидкості фільтрації підземних вод.

Fig. 3. Scheme of tracer test for estimating of groundwater flow velocity.

Моделювання геофільтраційних процесів

Для розрахунків фільтраційних процесів було використано програмне забезпечення Visual Modflow 3.0 (<https://www.waterloohydrogeologic.com/products/visual-modflow-flex/>), яке є пре-процесором / пост-процесором для програми MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1984). Розрахунки фільтрації виконувалися у профільній схематизації для умов сталої фільтрації підземної води. Розрахунковий профіль показаний на рис. 1. Для калібрування (підбору параметрів) фільтраційної моделі на основі даних моніторингу РГВ у спостережних свердловинах використовувалася програма PEST (Doherty, Hunt, 2010) (www.pesthomepage.org).

РЕЗУЛЬТАТИ

Уточнені оцінки інфільтраційного живлення підземних вод

Графік РГВ по св. 1–2019, розташований в межах першої тераси (див. рис. 1), за 2020–2023 рр. показаний на рис. 4. Річна сезонна амплітуда коливань РГВ по цій свердловині в зазначений період становила 1–1,2 м.

Оцінена за методикою МРС швидкість рецесії РГВ сягала в середньому від $\Delta H/\Delta t = 5$ мм/добу ($H = 59$ м) до 17 мм/добу ($H = 60,5$ м) (рис. 5). Коефіцієнт водовіддачі супісків, що складають верхню частину геологічного розрізу в зоні коливань РГВ, при розрахунках був прийнятий 0,06–0,08 (Johnson, 1967). Результуюче середнє за 3 роки спостережень (2020–2023 рр.) інфільтраційне живлення безнапірного горизонту для умов промайданчика ПХЗ в межах першої тераси оцінюється в 190–300 мм/рік. Аналогічний розрахунок для другої тераси ПХЗ з використанням даних моніторингу РГВ по св. 3–20 дає оцінку інфільтраційного живлення в діапазоні 150–220 мм/рік. Зазначені оцінки включають як природну складову (інфільтрація атмосферних опадів), так і техногенну складову (витоки із мереж водопостачання, зливової каналізації тощо).

Отримані оцінки узгоджуються з літературними даними, зокрема з дослідженням В. Ю. Саприкіна з колегами (Саприкін та ін., 2019), де для природних умов промайданчика ПХЗ методом моделювання за допомогою програми HYDRUS1D було оцінено, в залежності від літології ґрунтів зони аерації і наявності рослинного покриву, інфільтраційне живлення підземних вод унаслідок

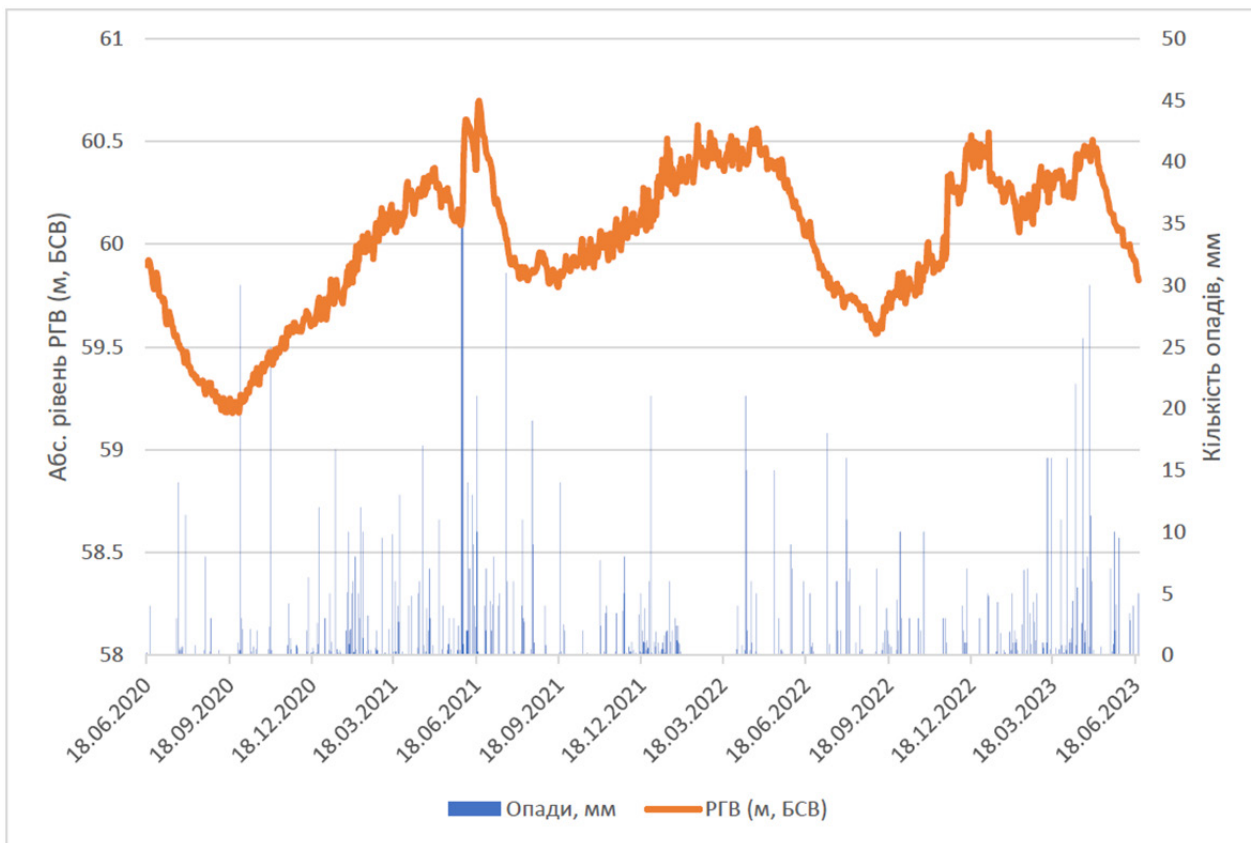


Рис. 4. Графік РГВ по св. 1–2019, одержаний за допомогою датчика TD-Diver (дані про опади з метеостанції в м. Дніпро, 40 км від м. Кам'янське).

Fig. 4. Graph of groundwater level for well 1–2019 obtained using the TD-Diver sensor (precipitation data are from the Dnipro weather station, 40 km from Kamianske City).

інфільтрації опадів у діапазоні 110–220 мм/рік. Варто зазначити, що пан'європейська карта інфільтраційного живлення для аналогічних ПХЗ широтних, топографічних і ландшафтних умов показує значення інфільтраційного живлення в діапазоні 100–300 мм/рік (Martinsen et al., 2022).

В попередніх роботах з моделювання фільтрації на регіональній моделі території ПХЗ (Скальський та ін., 2011) використовувалися помітно менші значення інфільтраційного живлення: 100 мм/рік для першої тераси, 75 мм/рік — для другої тераси р. Дніпро, які були експертними оцінками.

Результати трасерного експерименту

Трасерний експеримент був проведений на св. 106 в жовтні 2012 р. На початку експерименту в нижню частину свердловини, ізольовану пакером, було внесено 4 мл концентрованого розчину родаміну. Ізольований пакером об'єм свердловини з індикатором становив 19 л. Довжина фільтра свердловини — 2 м. Після введення індикатора

розчин перемішувався перистальтичним насосом (швидкість покачування 0,5 л/хв) протягом 1 години для гомогенізації концентрації індикатора в об'ємі пакера.

У наступний період у ході експерименту з розчину індикатора відбирали проби кожні 15–30 хв. Графік зниження концентрації індикатора в свердловині, одержаний в ході експерименту 12 жовтня 2012 р., показаний на рис. 5.

Застосування схеми розрахунку згідно роботи (Чураєв, Ільїн, 1967) в залежності від припущення про ширину зони перехвату фільтраційного потоку свердловиною (1 або 2 діаметри свердловини) дає оцінку дійсної швидкості фільтрації в діапазоні 0,26–0,52 м/добу. При цьому приймалося, що пористість порід водоносного горизонту дорівнює 0,3. Враховуючи, що на момент проведення експерименту градієнт напору підземних вод на ділянці св. 106 становив 0,01, відповідні значення коефіцієнта фільтрації водоносного горизонту оцінюються в діапазоні 7,8–15,6 м/добу.

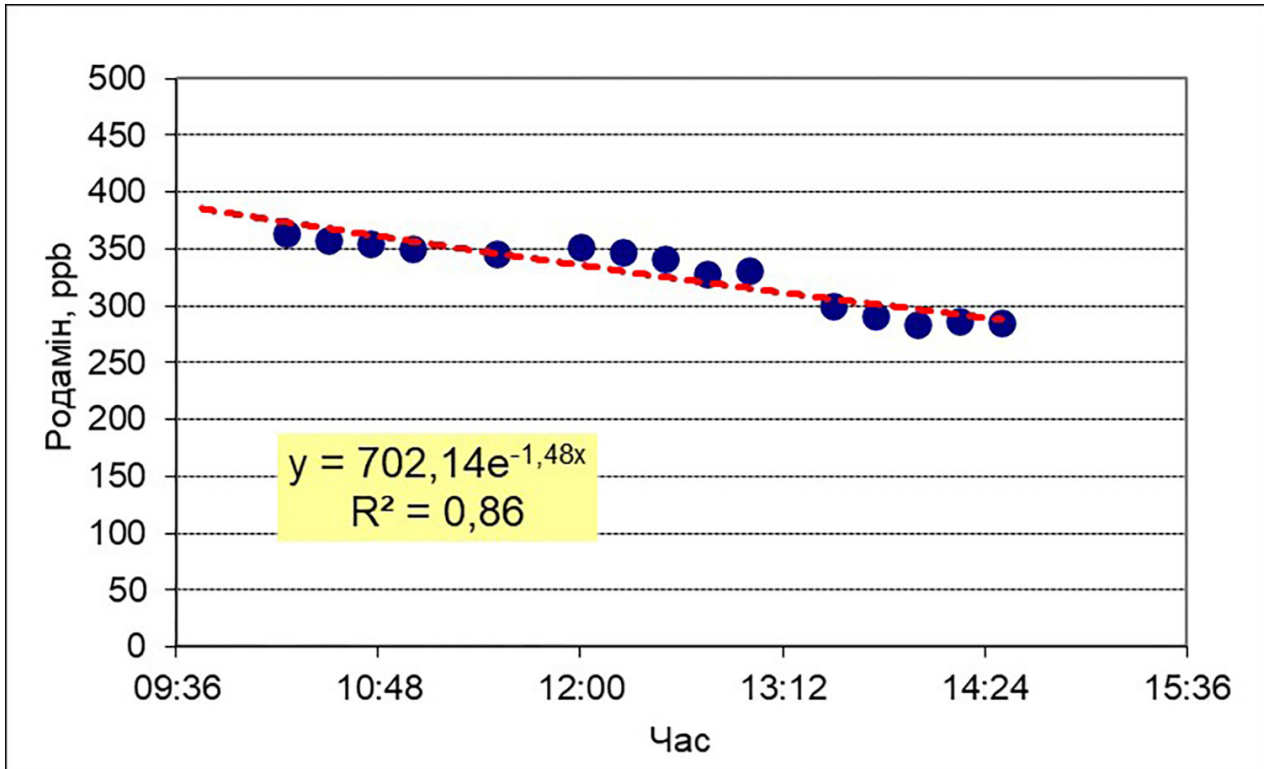


Рис. 5. Результати трасерного експерименту в св. 106.

Fig. 5. Results of tracer test in well 106.

Калібрування моделі і розрахунки геофільтраційних процесів (поточні умови)

Розрахункова сітка та граничні умови профільної геофільтраційної моделі, побудованої із застосуванням програми Visual Modflow 3.0, що описує сталу фільтрацію підземних вод у системі «хвостосховище «Західне» – р. Коноплянка», показані на рис. 6, А. Лінія розрахункового профілю наведена на рис. 1. На південній і північній границях профілю задавалися граничні умови першого роду (значення напору підземних вод на основі даних спостережень). На р. Коноплянка задавалася гранична умова типу “River”.

В межах хвостосховища задавалося значення інфільтраційного живлення 50 мм/рік, яке було оцінене методом балансу хлор-іону в підземних водах (Заноз та ін., 2021). В межах першої і другої терас задавалися значення інфільтраційного живлення відповідно 200 і 150 мм/рік, що відповідає нижній межі з діапазону оцінок, одержаних із застосуванням WTF-методу (див. Результати). Використання більших значень інфільтраційного живлення призводило до завищених значень коефіцієнтів фільтрації при калібруванні моделі, які

не узгоджуються з даними дослідно-фільтраційних робіт (див. нижче).

Калібрування фільтраційної моделі відбувалося шляхом підбору коефіцієнтів фільтрації (Кф) водоносного горизонту в алювіальних відкладах для ділянок першої і другої терас р. Дніпро (рис. 6, А). В якості критерію для калібрування використані середні за період спостережень (2005–2021 рр.) значення напору підземних вод у спостережних свердловинах між хвостосховищем і р. Коноплянка (див. рис. 7). Для інших різновидів порід застосовані оцінки Кф за даними попередніх досліджень з моделювання (Ткаченко та ін., 2020; Skalskij et al., 2011). За результатами калібрування моделі Кф для алювіальних пісків першої тераси оцінюється в 13 м/добу, для другої тераси – 1,3 м/добу.

Варто зазначити, що одержане при калібруванні фільтраційної моделі значення Кф для пісків першої тераси узгоджується з діапазонною оцінкою коефіцієнта фільтрації 7,8–15,6 м/добу, яка була одержана при проведенні трасерного експерименту в св. 106.

Гідродинамічна сітка фільтрації відкаліброваної моделі показана на рис. 6, Б. Час фільтрації під-

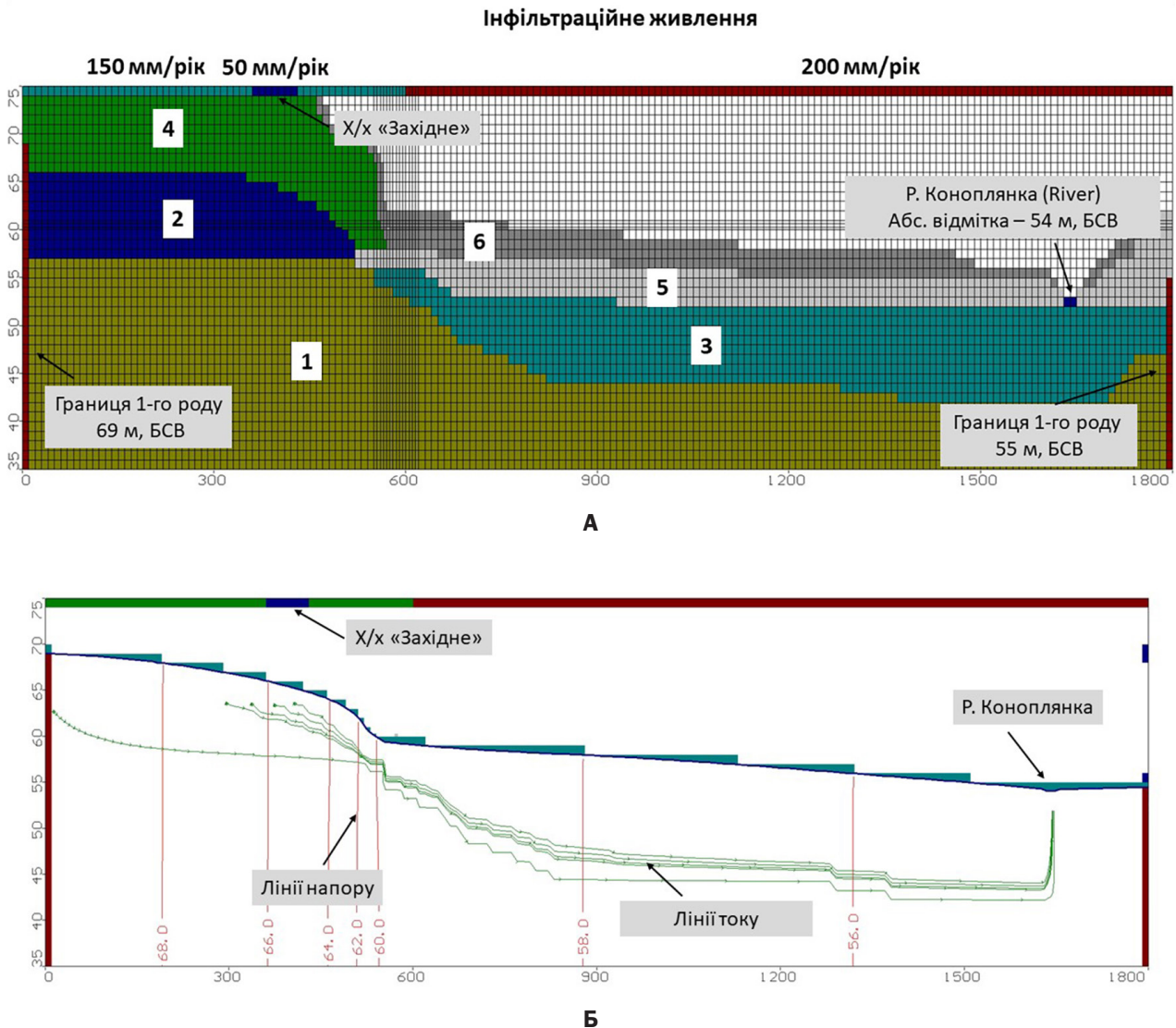


Рис. 6. А. — розрахункова сітка, коефіцієнти фільтрації і граничні умови профільної фільтраційної моделі хвостосховища «Західне»: 1 — тріщинуваті граніти, $K_f = 0.0001$ м/добу; 2 — алювіальні піски (друга тераса), $K_f = 1.3$ м/добу; 3 — алювіальні піски (перша тераса), $K_f = 13$ м/добу; 4 — лесові суглинки, $K_f = 0.1$ м/добу; 5 — супіски, $K_f = 2.5$ м/добу; 6 — техногенні ґрунти, $K_f = 0,3$ м/добу). **Б.** — гідродинамічна сітка фільтрації за даними моделювання для відкаліброваної моделі.

Fig. 6. A. — numerical grid, hydraulic conductivities values and boundary conditions of the profile groundwater flow model of the “Zahidne” uranium mill tailing: 1 — fractured granites, hydraulic conductivity (K) = 0.0001 m/day; 2 — alluvial sands (2nd terrace), $K = 1.3$ m/day; 3 — alluvial sands (1st terrace), $K = 13$ m/day; 4 — clay loam, $K = 0.1$ m/day; 5 — sandy loam, $K = 2.5$ m/day; 6 — man-made soils, $K = 0.3$ m/day). **Б.** — hydrodynamic flow net based on modelling for the calibrated model.

земних вод від хвостосховища до р. Коноплянка оцінюється на відкаліброваній моделі в 13 років. Це помітно менше, ніж попередні оцінки на регіональній фільтраційній моделі, де відповідний час фільтрації підземних вод оцінювався у 20 років (Ткаченко та ін., 2020).

Аналіз впливу ремедіаційних заходів на гідродинамічні умови міграції радіоактивних забруднювачів із хвостосховища

Останні роки розглядалася можливість проведення низки заходів у рамках робіт з ремедіації території ПХЗ, які потенційно можуть вплинути на умови міграції радіоактивних забруднювачів у підземні води із хвостосховища «Західне» (Ткаченко

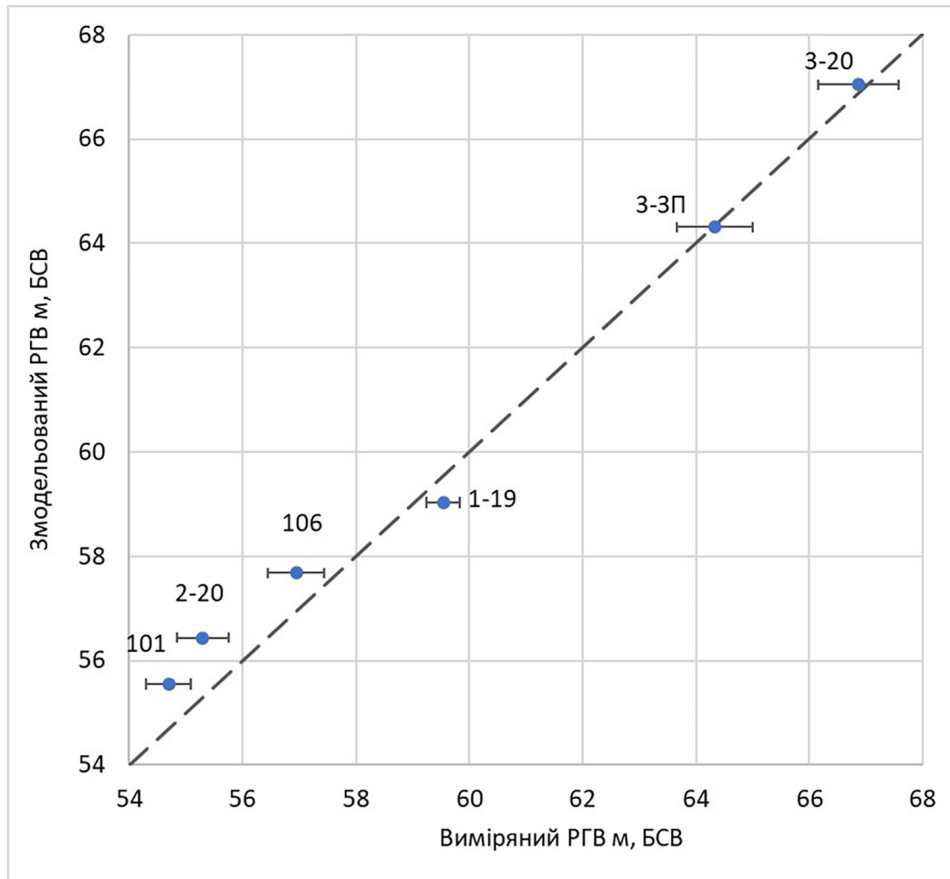


Рис. 7. Результати калібрування фільтраційної моделі. Горизонтальні риси показують стандартне відхилення значень РГВ у свердловинах за період спостережень.

Fig. 7. Results of calibration of the groundwater flow model. The horizontal lines show the standard deviation of the groundwater level values in wells over the observation period.

та ін., 2020). Зокрема, для зниження підтоплення території ПХЗ пропонувалося поглиблення русла р. Коноплянка і пониження рівня води в ній на 1 м. Для хвостосховища «Західне» розглядалися варіанти ремедіації з вилученням хвостового матеріалу або влаштуванням покращеного ґрунтового верхнього екрана. Також нами запропоновано захід, що полягає у ремонті мереж водопроводу, каналізації і дренажних колекторів на території ПХЗ для ліквідації техногенних витоків, що може вплинути на інфільтраційне живлення підземних вод. Крім того, нами розглянуто сценарій довгострокових змін клімату, що може вплинути на величини інфільтраційного живлення підземних вод. Так, для регіонів з помірним кліматом очікується тенденція до збільшення інфільтраційного живлення взимку, зменшення живлення влітку та змішаний ефект восени та навесні, із загальним ефектом у бік збільшення річних величин живлення підземних вод. У Південній Європі інфільтраційне живлення

ґрунтових вод, вірогідно, буде нижчим (Rieadel, Weber, 2020; Hughes et al., 2021). Виходячи з консервативних передумов, у відповідному сценарії було зроблено припущення про збільшення інфільтраційного живлення досліджуваної ділянки на 30% порівняно з поточними умовами. Відповідні заходи та їх вплив на гідродинамічні умови, що оцінені за допомогою геофільтраційної моделі, представлені в таблиці.

Виконані розрахунки показують, що змодельовані сценарії ремедіаційних заходів, за винятком ремонту водопровідних мереж, мають відносно незначний вплив на гідродинамічні умови в зоні впливу хвостосховища. Зменшення техногенної компоненти інфільтраційного живлення внаслідок ремонту водопровідних мереж призводить до помітного зменшення швидкостей фільтрації і відповідно збільшує час міграції радіоактивних забруднень за межі проммайданчика ПХЗ і в напрямку р. Коноплянка. Також цей захід матиме

Таблиця. Вплив ремедіаційних заходів на проммайданчику ПХЗ і змін клімату на гідродинамічні умови фільтрації підземних вод у зоні хвостосховища «Західне»

Table. The impact of remediation measures at the PChP industrial site and climate changes on the hydrodynamic conditions of groundwater flow in the zone of “Zahidne” uranium mill tailing

Сценарій ремедіаційних заходів	Результати	
	Час фільтрації до р. Коноплянка, роки	Швидкість фільтрації Дарсі, м/рік
Базовий сценарій	13	19
Поглиблення русла і зменшення рівня р. Коноплянка на 1 м	12	21
Облаштування нового екрана на хвостосховищі «Західне» (інфільтраційне живлення зменшується до 10 мм/рік)	13	19
Вилучення хвостів (видаляється джерело забруднення в хвостах; інфільтраційне живлення в межах хвостосховища змінюється на 150 мм/рік)	12	21
Ремонт мереж водопроводу, каналізації і дренажних колекторів на території ПХЗ для ліквідації техногенних витоків (інфільтраційне живлення в межах майданчика ПХЗ зменшується вдвічі)	17	15
Довгострокові зміни клімату (збільшення інфільтраційного живлення на 30 %)	11	23

позитивний вплив на зменшення підтоплення території ПХЗ. Таким чином, розрахунки показують доцільність реалізації зазначеного заходу з позицій поліпшення гідрогеологічних умов на території ПХЗ та захищеності підземних і поверхневих вод від техногенного забруднення.

ВИСНОВКИ

Виконані гідрогеологічні спостереження дозволили уточнити значення інфільтраційного живлення підземних вод у зоні впливу хвостосховища «Західне» в межах першої тераси (оціночне значення 200 мм/рік) і другої тераси (150 мм/рік). Це приблизно вдвічі вище, ніж значення, що використовувалися в попередніх дослідженнях з гідрогеологічного моделювання ПХЗ. Значна частка інфільтраційного живлення в межах промзони ПХЗ, вірогідно, обумовлена техногенними компонентами – витокami із деградованих водних комунікацій (водопровід, зливові каналізація тощо). На основі трасерного експерименту дійсна швидкість фільтрації підземних вод у безнапірному водоносному горизонті в зоні впливу хвостосховища оцінена в 0,26–0,52 м/добу.

Детальна профільна геофільтраційна модель хвостосховища «Західне» на основі програми Visual Modflow, побудована і відкалібрована із використанням уточнених даних про геологічну будову і гідрогеологічні умови досліджуваної ділянки, які були отримані в останні роки, показала суттєво вищі (приблизно на 50%) швидкості фільтрації в водоносному горизонті в зоні впливу хвостосховища «Західне» порівняно з попередніми оцінками на регіональній фільтраційній моделі.

Моделювання кількох сценаріїв ремедіаційних заходів показало, що ремонт водопровідних мереж на проммайданчику ПХЗ з метою зменшення техногенної компоненти інфільтраційного живлення може привести до помітного зменшення швидкостей фільтрації і сприятиме кращій захищеності підземних і поверхневих вод від радіоактивного забруднення.

Дані розрахунку MODFLOW (швидкості фільтрації підземної води в геологічному середовищі в межах розрахункового профілю) будуть використані на наступному етапі досліджень для побудови геоміграційної моделі з метою прогнозування довгострокових радіологічних і токсикологічних

впливів хвостосховища «Західне» на підземні і поверхневі води.

Представлені дослідження проведені 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». Дані трасерного експери-

менту були одержані в 2012 р. у проєкті технічної допомоги Шведського агентства міжнародного розвитку (SIDA) «Геохімічна характеристика, моделювання та оцінка ризиків щодо забруднення ґрунтових та поверхневих вод радіонуклідами та токсичними речовинами на проммайданчику Придніпровського хімічного заводу» (коротка назва – «ЕНШУРЕ – Академічний»).

REFERENCES

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). Pp. 56–70. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240111> (In Ukrainian).

Zanoz B. Yu., Tkachenko K. Yu., Bugai D. O., 2021. Analysis of hydrogeological and geochemical factors governing migration of radionuclides and toxic metals from uranium tailings to groundwater. *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine*. Vol. 14, iss. 2. Pp. 83–95. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245705>.

Kuzovov Yu. I. Pridneprovskiy Chemical Plant (historical review). Dnepropetrovsk: Poligrafist, 1997. 160 p. (In Russian).

Lavrova, T. V., Korychenskyi, K. O., Voitsekhovych, O. V., 2022. Assessment of temporal and space-time changes of groundwater chemical composition at the “Pridnirovsky chemical plant” uranium production legacy site. *Hidrolohiiia, hidrokhimiiia i hidroekolohiiia. Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. № 4 (66). Pp. 81–95. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.4.9>. (In Ukrainian).

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*. Vol. 14 (1). Pp. 55–63. (In Ukrainian).

Saprykin V. Yu., Bugai D. O., Skalskyi O. S., 2019. Model estimation of moisture infiltration rates through engineered soil covers of the uranium mill tailings at the Pridneprovsky chemical plant (Kamianske). *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine*. Vol. 12. Pp. 84–94. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185747>.

Tkachenko E., Skalskyi A., Bugai D., Lavrova T., Protsak V., Kubko Yu., Avila R., Zanoz B., 2020. Monitoring of technogenic contamination of groundwater and surface water in the zone of influence of uranium tailings of the Pridneprovsky Chemical Plant (Kamyanske). *Geological Journal*. No. 3 (372). Pp. 17–35. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.3.206341> (In Ukrainian).

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>.

Заноз Б. Ю., Ткаченко К. Ю., Бугай Д. О. Аналіз гідрогеологічних і геохімічних факторів міграції радіонуклідів і токсичних металів із уранового хвостосховища в підземні води. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2021. Т. 14, вип. 2. С. 83–95. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2021.245705>.

Кузовов Ю. І. Придніпровський хімічний завод (історический очерк). Днепропетровск: Полиграфист, 1997. 160 с.

Лаврова Т. В., Кориченський К. О., Войцехович О. В. Оцінка багаторічних просторово-часових змін хімічного складу підземних вод у зоні впливу колишнього уран-переробного підприємства ВО «Придніпровський хімічний завод». *Гідрологія, гідрохімія і гідрокологія*. 2022. № 4 (66). С. 81–95. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.4.9>.

Процак В. П., Кашпаров 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.

Саприкін В. Ю., Бугай Д. О., Скальський О. С. Модельні оцінки інфільтраційних потоків крізь ґрунтові екрани хвостосховищ промислових відходів Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське). *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2019. Т. 12. С. 84–94. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185747>.

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). *Геологічний журнал*. 2020. № 3 (372). С. 17–35. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.3.206341>.

Churaev N. V., Ilyin N. I., 1967. Radio-indicator methods for characterization of groundwater flow. Atomizdat Publishers, Moscow 124 p. (In Russian).

Bugai D. O., Laptev G. V., Skalskiy 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*. Vol. 16, no. 3. Pp. 254–261. <https://doi.org/10.15407/jnpae2015.03.254>.

Doherty J., and Hunt R. J., 2010. Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for groundwater-model calibration: USGS Scientific Investigations Report 2010–5169. Reston: U. S. Geological Survey. 59 p. <https://doi.org/10.3133/sir20105169>.

Gumuła-Kawęcka A., Jaworska-Szulc B., Szymkiewicz A., Górczewska-Langner W., Pruszkowska-Caceres M., Angulo-Jaramillo R., Simůnek J., 2020. Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *Journal of Hydrology*. Vol. 605. P. 127283 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127283>.

Healy R. W., Cook P. G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*. Vol. 10. Pp. 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>.

Hughes A., Mansour M., Ward R., Kieboom N., Allen S., Seccombe D., Charlton M., Prudhomme C., 2021. The impact of climate change on groundwater recharge: National-scale assessment for the British mainland, *Journal of Hydrology*, Vol. 598, P. 126336, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126336>.

Johnson A. I., 1967. Specific yield – Compilation of specific yield for various materials. Geological Survey water supply paper 1662D, Washington: U. S. Government printing office. 80 p.

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.* Vol. 115. Pp. 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.06.011>.

Martinsen G., Bessiere H., Caballero Y., Koch J., Collados-Lara A. J., Mansour M., Sallasmaa O., Pulido-Velazquez D., Hunter Williams N., Zaadnoordijk W., Stisen S., 2022. Developing a pan-European high-resolution groundwater recharge map – Combining satellite data and national survey data using machine learning. *Sci. Total Environ.* Vol. 822. P. 153464 <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153464>.

McDonald, M. G., Harbaugh, A. W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. In: Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6. Reston: U. S. Geological Survey, 1984. 528 p.

Riedel T., Weber T., 2020. Review: The influence of global change on Europe’s water cycle and groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*. Vol. 28. Pp. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02165-3>.

Skalski 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,

Чураев Н. В., Ильин Н. И. Радиоиндикаторные методы исследования движения подземных вод. М.: Атомиздат. 1967. 124 с.

Bugai D. O., Laptev G. V., Skalskiy 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>.

Doherty J., and Hunt R. J. Approaches to highly parameterized inversion: A guide to using PEST for groundwater-model calibration: USGS Scientific Investigations Report 2010–5169. Reston: U. S. Geological Survey, 2010. 59 p. <https://doi.org/10.3133/sir20105169>.

Gumuła-Kawęcka A., Jaworska-Szulc B., Szymkiewicz A., Górczewska-Langner W., Pruszkowska-Caceres M., Angulo-Jaramillo R., Simůnek J. Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *Journal of Hydrology*. 2022. Vol. 605. P. 127283 <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127283>.

Healy R. W., Cook P. G. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*. 2002. Vol. 10. P. 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>.

Hughes A., Mansour M., Ward R., Kieboom N., Allen S., Seccombe D., Charlton M., Prudhomme C. The impact of climate change on groundwater recharge: National-scale assessment for the British mainland. *Journal of Hydrology*. 2021. Vol. 598. P. 126336, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126336>.

Johnson A. I. Specific yield – Compilation of specific yield for various materials. Geological Survey water supply paper 1662D, Washington: U. S. Government printing office, 1967. 80 p.

Lavrova T. V., Voitsekhovych O. V. 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>.

Martinsen G., Bessiere H., Caballero Y., Koch J., Collados-Lara A. J., Mansour M., Sallasmaa O., Pulido-Velazquez D., Hunter Williams N., Zaadnoordijk W., Stisen S. Developing a pan-European high-resolution groundwater recharge map – Combining satellite data and national survey data using machine learning. *Sci. Total Environ.* 2022. Vol. 822, P. 153464 <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153464>.

McDonald, M. G., Harbaugh, A. W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. In: Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6. Reston: U. S. Geological Survey, 1984. 528 P.

Riedel T., Weber T. Review: The influence of global change on Europe’s water cycle and groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*. 2020. Vol. 28. P. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02165-3>.

Skalski 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. Pp. 219–228. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22122-4>.

Tkachenko Y., 2020. The Prydniprovsky Chemical Plant – Ukraine’s uranium heritage. Survey report on the activity history and the modern state of the former production association «Prydniprovsky Chemical Plant». Oslo: Bellona Foundation. 121 p.

Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. P. 219–228. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22122-4>.

Tkachenko Y. The Prydniprovsky Chemical Plant – Ukraine’s uranium heritage. Survey report on the activity history and the modern state of the former production association «Prydniprovsky Chemical Plant». Oslo: Bellona Foundation, 2020. 121 p.

Manuscript received March 10, 2023;
revision accepted May 4, 2023.

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна