

УДК 502:504:556.3

DOI https://doi.org/10.32782/geotech2024.38.05

Заноз Б. Ю., Бугай Д. О.

Заноз Б. Ю., молодший науковий співробітник відділу інженерної геології Інституту геологічних наук НАН України, ORCID: 0000-0002-8581-4462, bzanoz@gmail.com

Бугай Д. О., провідний науковий співробітник відділу інженерної геології Інституту геологічних наук НАН України, ORCID: 0000-0002-2404-5639, dmitri.bugay@gmail.com

ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОСТРОКОВИХ НЕГАТИВНИХ ВПЛИВІВ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТОВИХ ВОД НА ОБ'ЄКТАХ УРАНОВОЇ СПАДЩИНИ

Анотація. Використовуючи методологію МАГАТЕ ISAM (International Safety Assessment Methodology), інформацію про звички місцевого населення та статистичні дані про споживання продуктів харчування розраховано дозові коефіцієнти для радіонуклідів ряду урану-238 для декількох сценаріїв використання місцевим населенням підземних і поверхневих вод у зоні впливу уранового об'єкта ядерного спадку – Придніпровського хімічного заводу, м. Кам'янське (ПХЗ). Зазначені сценарії враховують такі шляхи опромінення: споживання питної води, зрошення сільськогосподарських культур, рибальство та використання річкового пляжу для відпочинку. Дозові розрахунки виконані за допомогою програмного забезпечення NORMALYSA з використанням рекомендованих МАГАТЕ математичних моделей і радіоекологічних параметрів. Отримані за результатами моделювання дозові коефіцієнти (які мають розмірність (Зв рік) / (Бк м³)) дають змогу розрахувати ефективні дози опромінення шляхом їх масштабування з фактичними концентраціями радіонуклідів, вимірними в підземних і поверхневих водах під час моніторингу або визначеними шляхом моделювання геоміграційних процесів. Зазначений підхід для дозових розрахунків може бути використаний для уранових об'єктів, розташованих в аналогічних до ПХЗ антропогенних умовах. Описана методологія застосована для обґрунтування ремедіаційних заходів, які передбачають ізоляцію радіоактивно забруднених ґрунтів, розташованих на Північному майданчику ПХЗ, за допомогою захисних ґрунтових екранів. Згідно з рекомендаціями МАГАТЕ, критерієм радіологічної безпеки для «існуючих ситуацій опромінення» було прийнято річну ефективну дозу 1 мЗв/рік. За результатами прогнозного моделювання ізоляція і зберігання забруднених ґрунтів в межах Північного майданчика ПХЗ не несе неприйнятних ризиків радіоактивного забруднення підземних вод.

Ключові слова: радіоактивне забруднення підземних вод, дозові розрахунки, ремедіаційні заходи, Придніпровський хімічний завод.

Вступ. Актуальність проблеми оцінки наслідків радіоактивного забруднення підземних і поверхневих вод для уранових об'єктів ядерного спадку визначається тим, що геоміграційні процеси є потенційним чинником небезпечних впливів на довкілля та населення (Carvalho, 2011). Кількісна оцінка таких негативних впливів є ключовою передумовою для планування ремедіаційних заходів. Одним із найбільш важливих уранових об'єктів ядерного спадку в Україні є колишнє виробниче об'єднання «Придніпровський хімічний завод» (м. Кам'янське). Це підприємство функціонувало в період 1949–1991 років та спеціалізувалося на виробництві уранового концентрату (жовтого кеку). Після розпаду СРСР підприємство не було належним чином виведено з експлуатації. У межах ПХЗ розташовані уранові хвостосховища, ставки-шламовідстійники, забруднені радіохімічні цехи, майданчик розвантаження уранової руди й інші об'єкти, які входили до циклу виробництва уранового концентрату. У межах території ПХЗ підземні води забруднені радіонуклідами ряду розпаду урану-238, макроіонами та токсичними металами (Бугай та ін., 2021). Забруднені

підземні води розвантажуються в р. Коноплянка, яка протікає вздовж північної межі ПХЗ на відстані 1 км і впадає у р. Дніпро.

Нижче наведено набір дозових коефіцієнтів для радіонуклідів ряду урану-238, які було розраховано з метою оцінки радіологічних впливів для населення від водовикористання підземних і поверхневих вод у зоні впливу ПХЗ. Для розрахунку дозових коефіцієнтів використані моделі й параметри, описані в (Zanoz et al., 2022). Отримані дозові коефіцієнти було використано для обґрунтування ремедіаційних заходів, запланованих на забруднених ділянках Північного промислового майданчика ПХЗ.

Мета. Напрацювання інструментарію для оцінки потенційних дозових навантажень на населення, обумовлених забрудненням підземних і поверхневих вод у зоні впливу об'єктів ядерного спадку.

Викладення основного матеріалу. У нашій попередній роботі (Zanoz et al., 2022) згідно з методологією МАГАТЕ ISAM (International Safety Assessment Methodology) (IAEA, 2004) було сформульовано і змодельовано набір сценаріїв можливого використання

забруднених водних ресурсів «репрезентативними особами» із числа місцевого населення в зоні впливу уранових об'єктів Придніпровського хімічного заводу. За визначенням, репрезентативна особа – це особа, що є характерною для найбільш опромінених осіб у відповідній популяції (IAEA, 2022). Сценарії передбачають внутрішнє опромінення репрезентативної особи через споживання забрудненої питної води, сільгосппродуктів та/або риби. Сценарій рекреаційної діяльності передбачав опромінення через інгаляцію забруднених часток пилу, а також зовнішнє опромінення на пляжі річки. Опис змодельованих сценаріїв наведено в таблиці 1.

Зазначені сценарії були змодельовані за допомогою програмного забезпечення MAGATE NORMALYSA (<https://project.facilia.se/normalysa/index.html>). Для прогнозування дозових впливів на населення були використані моделі й параметри, рекомендовані MAGATE (звіти SRS-19, TRS-472), НРБУ-97, а також статистичні дані України про споживання продуктів населенням. Радіологічні оцінки проводилися для радіонуклідів ряду урану: уран-238/234, радій-226, полоній-210, свинець-210.

Для розглянутих сценаріїв водокористування шляхом моделювання в цьому дослідженні було розраховано набори дозових коефіцієнтів для одиничних концентрацій забруднювачів у воді (1 Бк/м³) для реалістичних і консервативних наборів вхідних параметрів (для дорослого та 10-річної дитини). «Реалістичний» набір даних використовує середні значення коефіцієнтів накопичення забруднювальних речовин у сільськогосподарській продукції та риби. У «консервативному» (песимістичному) сценарії використовуються максимальні значення коефіцієнтів накопичення, а також припущення про вищі обсяги споживання забрудненої продукції та/або часу, проведеного на забрудненій території. Таким чином, консервативний набір параметрів забезпечує верхню межу для оцінки потенційних негативних впливів. Детальний опис вхідних даних наведено в (Zanoz et al., 2022).

Отриманий набір дозових коефіцієнтів для сценарію 1 (використання забруднених підземних вод) наведено в таблиці 2. Дозові коефіцієнти для інших сценаріїв наведено у (ІГН, 2023).

Таким чином, дозові коефіцієнти для відповідного сценарію водокористування від забруднювача «і»

Таблиця 1. Опис змодельованих сценаріїв водокористування (Zanoz et al., 2022)

Table 1. Description of modeled scenarios of water usage (Zanoz et al., 2022)

Сценарій (джерело води)	Шлях впливу (% річного споживання місцевих продуктів або тривалість впливу)			
	Питна вода	Зрошення сільськогосп. культур	Споживання риби	Відпочинок на пляжі
Сценарій-1 (підземні води)				
Реалістичний	10 %	100 % (картопля)	-	-
Консервативний	25 %	100 % (картопля), 50 % (овочі)	-	-
Сценарій-2 (р. Коноплянка)				
Реалістичний	-	100 % (картопля)	100 %	-
Консервативний	-	100 % (картопля), 50 % (овочі)	100 %	-
Сценарій-3 (р. Дніпро)				
Реалістичний	7 %	-	50 %	24 дні на рік (4 години на день)
Консервативний	14 %	-	100 %	40 днів на рік (8 год/день)

Таблиця 2. Дозові коефіцієнти радіонуклідів для сценарію 1 – городництво з використанням підземних вод для поливу та питного використання, (Зв/рік)/(Бк/м³)

Table 2. Dose coefficients for Scenario 1 – Using groundwater for drinking and crop irrigation, (Sv/year)/(Bq/m³)

РН	Дорослий			Дитина		
	Споживання води	Споживання овочів (зрошення)	Сумарний	Споживання води	Споживання овочів (зрошення)	Сумарний
	Вірогідний сценарій					
U-238	4.32E-09	1.68E-09	6.00E-09	4.08E-09	1.78E-09	5.86E-09
U-234	4.70E-09	1.83E-09	6.53E-09	4.44E-09	1.93E-09	6.37E-09
Ra-226	2.69E-08	1.04E-08	3.73E-08	4.80E-08	2.08E-08	6.88E-08
Pb-210	6.62E-08	2.55E-08	9.18E-08	1.14E-07	4.92E-08	1.63E-07
Po-210	1.15E-07	4.44E-08	1.60E-07	1.56E-07	6.74E-08	2.23E-07
	Консервативний сценарій					
U-238	9.00E-09	2.23E-09	1.12E-08	8.50E-09	2.36E-09	1.09E-08
U-234	9.80E-09	2.42E-09	1.22E-08	9.25E-09	2.56E-09	1.18E-08
Ra-226	5.60E-08	1.60E-08	7.20E-08	1.00E-07	3.20E-08	1.32E-07
Pb-210	1.38E-07	4.34E-08	1.81E-07	2.38E-07	8.36E-08	3.21E-07
Po-210	2.40E-07	5.85E-08	2.98E-07	3.25E-07	8.87E-08	4.14E-07

(Dose coeff_i, (Зв/рік)/(Бк/м³)) являють собою річну ефективну дозу опромінення, яка формується внаслідок забруднення підземної або поверхневої води з об'ємною активністю радіонукліда «i» 1 Бк/м³.

Отримані дозові коефіцієнти дають змогу розраховувати потенційні радіологічні впливи на населення від водокористування для інших забруднених майданчиків ядерного спадку, які розташовані в антропогенних умовах (стосовно потенційних сценаріїв водокористування, звичок населення), близьких до умов ПХЗ, використовуючи дані про виміряні під час моніторингу або визначені шляхом моделювання концентрації забруднювачів у підземних і поверхневих водах.

Дози від конкретного сценарію використання забрудненої води обчислюються як:

$$Dose = \sum_{i=1}^N C_i \cdot Dose\ coeff_i \quad (1)$$

де: C_i – концентрація радіонукліду «i» у воді свердловини або водойми, Бк/м³ (виміряна або прогнозна), Dose coeff_i – дозовий коефіцієнт для відповідного сценарію для радіонукліду «i», (Зв/рік)/(Бк/м³).

Описана методологія застосована в цій роботі для обґрунтування ремедіаційних заходів, які передбачають ізоляцію радіоактивно забруднених ґрунтів, розташованих на Північному майданчику ПХЗ, за допомогою захисних ґрунтових екранів (для мінімізації ексгаляції радону та зниження потужності дози гама-випромінювання на поверхні «гарячих точок»). Північний майданчик ПХЗ являє собою промислову зону з діючими підприємствами, де за допомогою радіаційних обстежень було виявлено кілька ділянок локалізації радіоактивно забруднених ґрунтів, що вірогідно сформувалися внаслідок аварійних (або неорганізованих) скидів і витоків у ранній період експлуатації урано-переробних цехів ПХЗ (ІГН, 2023). Метою ремедіаційних заходів є приведення Північного майданчика ПХЗ до радіологічно-безпечного стану з метою його подальшого промислового (виробничого) використання. При цьому постало питання, чи є зберігання забруднених ґрунтів in situ безпечним з погляду впливу радіоактивних забруднень на підземні води.

За допомогою бібліотеки NORMALYSA було побудовано геоміграційну модель і спрогнозовано довгострокові концентрації радіонуклідів у підземних водах через вилугування із ґрунтів «гарячих точок». Змодельований сценарій передбачає використання забруднених підземних вод зі свердловин, розташованих за межами майданчика ПХЗ нижче за течією від «гарячих точок». Детальний опис геоміграційної моделі представлено у звіті (ІГН, 2023). Прогнозні концентрації в ґрунтових водах було скомбіновано з дозовими коефіцієнтами (див. табл. 2) для оцінки доз опромінення від відповідного сценарію (рис.1).

За результатами моделювання для реалістичних значень параметрів максимальні дози опромінення репрезентативних осіб від використання підземних вод у зоні впливу «гарячих точок» становлять менше ніж 1 мкЗв/рік. За консервативними параметрами оцінені потенційні дози

становлять 14 мкЗв/рік або менше (див. рис. 1). Відмінність у графіках дозових кривих для реалістичного і консервативного сценарію обумовлена тим, що у випадку консервативного сценарію на формування доз опромінення від забруднених підземних вод, окрім ізотопів урану, впливає радій-226. Таким чином, дози суттєво менші за референтний рівень дози в 1 мЗв/рік для «існуючих ситуацій опромінення» (ІАЕА, 2022), що свідчить про низький ризик забруднення ґрунтових вод від «гарячих точок». Отже, ремедіація цих об'єктів шляхом облаштування ґрунтових екранів є прийнятним підходом з позиції ризиків забруднення підземних вод унаслідок міграції радіонуклідів із радіоактивних матеріалів, що залишаються на відповідних ділянках Північного майданчику ПХЗ.

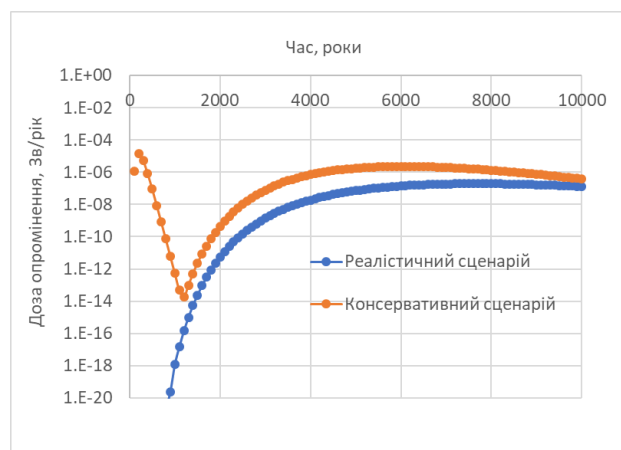


Рис. 1. Оцінки доз опромінення для сценарію 1 за міграції радіонуклідів із ділянок локалізації забруднених ґрунтів на Північному майданчику ПХЗ (для репрезентативної особи – дорослого)

Fig. 1. Predicted effective doses for scenario 1 for groundwater transport of radionuclides from the contaminated soils at the Northern PChP site to well (for a representative person – adult).

Висновки. Описані в цій роботі дозові коефіцієнти для радіонуклідів ряду урану-238 дають змогу розраховувати потенційні радіологічні впливи на населення від водокористування для забруднених уранових спадкових об'єктів, які розташовані в аналогічних до ПХЗ антропогенних умовах. Для дозових розрахунків можуть бути використані виміряні під час моніторингу або визначені шляхом моделювання концентрації радіоактивних забруднювачів у підземних і поверхневих водах. Застосування описаної методики для обґрунтування ремедіаційних заходів, спрямованих на ізоляцію ґрунтовими екранами «гарячих точок», розташованих у межах Північного майданчику ПХЗ з подальшим зберіганням забруднених ґрунтів in situ, показало, що запропонований підхід не несе неприйнятних ризиків радіоактивного забруднення підземних вод.

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».

Література

1. Бугай Д. О., Заноз Б. Ю., Лаврова Т. В., Кориченський К. О., Кубко Ю. І., Авіла Р., Рещь 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>.
2. ІГН, 2023. Звіт про НДР: Моніторинг, прогнозування і оцінка ризиків небезпечних гідрогеологічних процесів у складних природно-техногенних і інженерних умовах. Київ: Інститут геологічних наук НАН України, 2023. 178 с.
3. Carvalho F. Environmental Radioactive Impact Associated to Uranium Production. American Journal of Environmental Sciences. 2011. Vol. 7 (6). P. 547–53. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2011.547.553>.
4. IAEA, 2004. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Results of a coordinated research project. Vol. 1 Review and enhancement of safety assessment approaches and tools (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004) 408 p.
5. IAEA, 2022. Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Event, IAEA Safety Standards Series No. GSG-15 (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022) 201 p.
6. Zanoz B.Yu., Bugai D.O., Koliabina D., Avila R. Assessment of radiological and toxicological risks from the use of groundwater and surface water in the zone of influence of the uranium production legacy site. Nuclear Physics and Atomic Energy. 2022. Vol. 23 (4). P. 271–279. <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.04.271>

References

1. 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. *Geologichnyy Zhurnal*, 4 (377), 56–70. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.4.240111>.
2. Carvalho F. Environmental Radioactive Impact Associated to Uranium Production. *American Journal of Environmental Sciences*. 2011. Vol. 7 (6). P. 547–53. <https://doi.org/10.3844/ajessp.2011.547.553>.
3. IGS, 2023. Report: Monitoring, forecasting and risk assessment of hazardous hydrogeological processes in complex natural-technogenic and engineering conditions. Kyiv: Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, 2023. 178 p.
4. IAEA, 2004. Safety Assessment Methodologies for Near Surface Disposal Facilities Results of a coordinated research project. Vol. 1 Review and enhancement of safety assessment approaches and tools (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004) 408 p.
5. IAEA, 2022. Remediation Strategy and Process for Areas Affected by Past Activities or Event, IAEA Safety Standards Series No. GSG-15 (Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022) 201 p.
6. Zanoz B.Yu., Bugai D.O., Koliabina D., Avila R. Assessment of radiological and toxicological risks from the use of groundwater and surface water in the zone of influence of the uranium production legacy site. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2022. Vol. 23 (4). P. 271–279. <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.04.271>.

PREDICTION OF LONG-TERM NEGATIVE IMPACTS OF URANIUM PRODUCTION LEGACY SITES ON THE HYDROGEOLOGICAL ENVIRONMENT

Zanoz B. Yu., Bugai D. O.

Zanoz B. Yu., junior researcher of the Department of Engineering Geology of Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, ORCID: 0000-0002-8581-4462, bzanoz@gmail.com

Bugai D. O., senior researcher of the Department of Engineering Geology of Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, ORCID: 0000-0002-2404-5639, dmitri.bugay@gmail.com

Using the IAEA ISAM (International Safety Assessment Methodology) methodology, information on the habits of the local population and statistical data on food consumption, dose coefficients for uranium-238 radionuclides were calculated for several scenarios of use of groundwater and surface water by the local population in the zone of influence of the uranium production legacy site - Prydniprovsky Chemical Plant, Kamianske City (PChP). These scenarios consider the following exposure pathways: drinking water consumption, crop irrigation, fishing and use of the river beach for recreation. Dose calculations were made with NORMALYSA software with use of mathematical models and radioecological parameters recommended by the IAEA. The dose coefficients obtained as a result of the modelling (which have the dimension of (Sv year)/(Bq m³)) allow calculating radiation doses by scaling them with actual radionuclide concentrations measured in groundwater and surface waters during monitoring or determined by modelling of radionuclide transport processes in groundwater. The described approach to dose calculation can be applied for assessment of uranium legacy sites located in similar anthropogenic conditions. The described methodology was used to substantiate remediation measures that involve isolation of radioactively contaminated soils located at the PChP Northern Industrial Site using protective soil screens. According to the IAEA recommendations, an annual effective dose of 1 mSv/year was used as a radiological safety criterion for "existing exposure situations". According to the results of predictive modelling, isolation and storage of contaminated soils within the PChP Northern Industrial Site does not pose unacceptable risks of radioactive contamination of groundwater.

Key words: radioactive groundwater contamination, dose calculations, remediation measures, Prydniprovsky Chemical Plant.