

УДК 621.039.7

Ю. О. Ольховик

*ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України", м.Київ***ЩОДО ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗОНИ АЕРАЦІЇ
МАЙДАНЧИКА КОМПЛЕКСА "ВЕКТОР"**

Розглянуто геологічну будову зони аерації в районі майданчика комплексу "Вектор", призначеного для розміщення поверхневих сховищ для захоронення радіоактивних відходів. Показано, що зона аерації складається в основному з піщаних ґрунтів, для яких характерний великий вміст мілкодисперсних фракцій з наявністю глинистих мінералів. Проведений аналіз експериментально визначених сорбційних властивостей піщаних ґрунтів і розраховані значення коефіцієнтів розподілу радіонуклідів стронцію, цезію і плутонію для всієї товщі зони аерації. Проведена оцінка часу проходження водорозчинними нуклідами товщі зони аерації. Зазначено, що піщані ґрунти ненасиченої зони аерації в районі майданчика комплексу "Вектор" є досить дієвим природним бар'єром на шляху проникнення радіонуклідів із поверхневих сховищ у підземні води.

Ключові слова: зона аерації, піщані ґрунти, радіонукліди, сорбція, захисні властивості.

На майданчику комплексу "Вектор" планується розмістити практично всі низько- і середньоактивні радіоактивні відходи (РАВ) України, зокрема РАВ Чорнобильської АЕС (ЧАЕС), підприємств зони відчуження (ЗВ), працюючих АЕС з реакторами ВВЕР, Державних спеціалізованих комбінатів ДК "УкрДО "Радон". Згідно затвердженим проектним рішенням, всі сховища на майданчику комплексу "Вектор" є сховищами поверхневого типу.

Безпека зберігання і захоронення РАВ в цих сховищах забезпечується системою інженерних та природних бар'єрів. Основними компонентами інженерних бар'єрів є:

матриця, яка утримує радіонукліди (РН);

залізобетонний контейнер та монолітні залізобетонні секції сховища;

багатошаровий протифільтраційний екран.

Природними бар'єрами, які мають відіграти роль у попередженні потенційного радіологічного впливу РН у випадку їх вивільнення із сховищ комплексу "Вектор", є геологічні та гідрогеологічні особливості місця розташування майданчика. Захисні властивості природних бар'єрів повинні забезпечити мінімізацію надходження РН у природні компоненти і подальшого формування дозового навантаження на населення. Беручи до уваги можливість виникнення ситуацій, що призводять до руйнування інженерних бар'єрів, необхідно оцінити особливості нисхідної міграції РН у породах зони аерації (ЗА), як складової частини природних бар'єрів на шляху розповсюдження РН із поверхневих сховищ. В такому випадку ненасичена ЗА є єдиним захисним бар'єром між зруйнованим сховищем і ґрунтовим водоносним горизонтом.

Міграція РН у зоні аерації є складним природним процесом, інтенсивність якого залежить

від багатьох факторів, серед яких особливо слід відзначити форму знаходження РН, мінеральний і гранулометричний склад порід. Характерною особливістю процесу міграції у ненасиченій ЗА є наявність різних форм рухливості водної фази. Відрізняють більш рухливу гравітаційну воду, яка не зв'язана з поверхнею частинок і здатна переміщуватись під впливом сили тяжіння, і слабо рухливу капілярну воду, що міститься в гірських породах з капілярними порами та тріщинами, ширина яких менше 0,25 мм, а діаметр пор менше 1 мм. У випадку нисхідної міграції РН у ненасиченій ЗА має місце дифузія іонів з гравітаційної води до капілярної, що спільно із сорбцією призводить до зменшення швидкості переміщення радіонуклідів. Чим більша затримка РН в процесі міграції через ненасичену ЗА, тим більше радіонуклідів розпадеться і тим більший захисний потенціал геологічної системи.

Геологічна будова ЗА майданчика "Вектор". В геологічній будові зони аерації приймають участь середньоплейстоценові відклади, що створені флювіогляціальними, озерно-флювіогляціальними і моренними відкладами. У цілому ці породи гляціального комплексу дніпровського заледеніння. Флювіогляціальні відклади представлені піщано-глинистими ґрунтами. Піски світло-сірі, жовтувато-сірі до бурих, мілко- і середньозернисті, із прошарками пілуватих. У товщі пісків на різних глибинах зафіксовані лінзи глинистих ґрунтів. Глинисті ґрунти представлені жовтувато-бурими супісками і суглинками. Залігають у вигляді лінз і прошарків, їх потужність становить в основному 2—6 м. В районі комплексу "Вектор" зустрічаються насипні ґрунти, потужністю 0,5—1,9 м. При подальшому розгляді захисних властивостей ґрунтово-рослинний шар і насипні ґрунти не розглядаються. За даними Ки-

ївського інституту інженерних вишукувань “Енергопроект” середньоплейстоценові відклади поділяються на декілька літологічних різновидів, характеристики яких наведені у таблиці 1. За даними

Державного спеціалізованого підприємства “Чорнобильський спецкомбінат” глибина залягання рівня ґрунтових вод на комплексі “Вектор” становить 13,25 — 19,62 м.

Таблиця 1. Узагальнена характеристика літологічних різновидів

Ґрунти	Щільність сухого ґрунту, г/см ³	Природна вологість, об'ємна доля	Пористість	Вміст мілкої фракції, % 0,25-0,1 мм 0,01-0,005 мм
Пісок мілкий, щільний, неоднорідний за гранулометричним складом, світло-сірий, жовтувато-сірий	1,72	0,06 — 0,20	0,35	55 13,1
Пісок пилюватий, щільний, неоднорідний за гранулометричним складом, світло-сірий, жовтувато-сірий	1,73	0,09 — 0,19	0,35	49,3 33,5
Супісок піщанистий, світло-бурий, жовтувато-бурий, місцями з прошарками піску	1,78	0,13 — 0,17	0,33	31,6 13 ($<0,005-9,2$)
Суглинок легкий піщанистий, сірий, бурий, червонувато-коричневий, туго-та м'якопластичної консистенції	1,77	0,17	0,34	35 12,1 ($<0,005-10,9$)
Пісок середньої крупності, щільний, однорідний за гранулометричним складом, жовтувато-сірий	1,73	0,04 — 0,18	0,35	6,2

Найвні дані дають можливість оцінити час знаходження води в ЗА, тобто час нисхідної міграції $T_{за}$ за який атмосферні опади з поверхні ґрунту досягнуть рівня ґрунтових вод. Це значення можна вирахувати порівнянням об'єму води, що знаходиться у ЗА з величиною інфільтраційного живлення, характерного для умов ЗВ. Прийmemo, що потужність ненасиченої ЗА в районі майданчика “Вектор” складає $M = 14$ метрів. В результаті статистичної обробки більш як 60 значень природної об'ємної вологості (W) мілких пісків, які превалюють у геологічних розрізах в районі майданчика комплексу “Вектор”, отримана медіана значень, яка дорівнює $W = 0,127$. Щодо величини інфільтраційного живлення водоносного горизонту в зазначеному районі авторами [1] відмічено, що це питання практично не вивчене. Згідно із запропонованим розподілом інфільтраційного живлення (ϵ) на території ближньої зони ЧАЕС [1, рис.12.9] цей параметр для району майданчика комплексу “Вектор” складає $\epsilon = 120$ мм/рік. Однак в останній час авторами [2] на основі ізотопних датувань встановлено, що величина середньобагаторічного (за останні 60 років) інфільтраційного живлення підземних вод становить $\epsilon = 200$ мм/рік = 200 л/(м²•рік) на ділянці першої надплавної тераси р. Прип'ять у ближній зоні ЧАЕС. Виходячи із зазначеного $T_{за} = M \cdot W \cdot 1000 / \epsilon \approx 9$ років, що свідчить про високу швидкість нисхідної міграції води в ненасиченій ЗА. Єдиним механізмом захисту ґрунтового водоносно-

го горизонту від проникнення РН шляхом затримки їх міграції в ЗА є процеси сорбції на природних мінералах.

Сорбційні процеси в ненасиченій ЗА. Численні дослідження піщаних ґрунтів, розповсюджених у ЗВ, однозначно пов'язують їхню властивість до сорбції РН з наявністю у складі пісків глинистих мінералів (монтморилоніт, каолінит, гідрослюди тощо), які здебільше знаходяться у пильовій (0,05 — 0,005 мм) та глинистій ($<0,005$ мм) фракції і тому мають підвищені показники питомої поверхні.

Виконані рентгеноструктурні дослідження мінерального складу глинистої фракції супіску і суглинку, відібраних з свердловин на майданчику Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП), свідчать, що вона, крім кварцу, складається з хлориту (водний металаюмосилікат шаруватої структури), слюди, каолініту, гідратованого польового шпату та кальциту. Експериментальні визначення сорбційної здатності свідчать, що мілкодисперсні фракції є тим компонентом, який концентрує і утримує розчинні форми радіонуклідів, які надходять у ЗА з інфільтруючим потоком. Короткий опис відповідних процесів наведений у [3]. Визначені експериментально величини коефіцієнтів розподілу для основних дозоутворюючих радіонуклідів у ЗВ ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr і ²³⁹Pu наведені у публікаціях [4—6]. Для розуміння особливостей сорбційних процесів в системі “РН—ґрунти” слід відзначити, що для піщаних ґрунтів в районі майданчика “Вектор” характерний значний вміст мілких фракцій $<0,1$ мм (від 13,1 до 51,1%), які мають

достатньо розвинуту поверхню з активними сорбційними центрами. В той же час РН у природних водах мають надзвичайно малий масовий вміст — наприклад, активність ^{90}Sr 1000 Бк/л відповідає його концентрації лише $2 \cdot 10^{-4}$ мг/л. Не дивно, що для невисоких питомих активностей характерні лінійні ізотерми адсорбції (ізотерми Генрі), що вказує на неповне заповнення активних центрів на поверхні мінеральних компонентів ґрунтів [4].

З огляду на неоднорідність гранулометричного складу і мінерального складу пилових та глинистих фракцій піщаних ґрунтів в районі майданчика “Вектор”, не викликає подиву широкий діапазон значень коефіцієнтів розподілу K_d ^{90}Sr , ^{137}Cs і ^{239}Pu , які визначені авторами [6] при експериментальному дослідженні сорбції РН. Запропоновано для розрахунків використовувати медіану середньомінімальних значень K_d , що забезпечує більшу консервативність оцінки.

Таблиця 2. Середньомінімальні значення (медіана)

K_d для піщаних ґрунтів майданчика комплексу “Вектор”

Радіонуклід	Пісок м'який	Пісок пилюватий	Супісок піщанистий	Суглинок легкий піщанистий	Пісок середньої крупності
^{90}Sr	3,5 [4] 2,65	4,2	7,4	16	2,0
^{137}Cs	180	230	400	370	170
^{239}Pu	100	200	800	950	90

Для узагальненої оцінки захисних властивостей ЗА в районі майданчика комплексу “Вектор” були використані доступні дані про її геологічну будову, отримані при інженерно-геологічних вишукуваннях на майданчику ЦСВЯП реакторів ВВЕР АЕС України [7] та на майданчику Централізованого сховища для дострокового зберігання відпрацьованих джерел іонізуючого випромінювання (ЦСВДВ) [8], оскільки вони розташовані безпосередньо на майданчику комплексу “Вектор” або ж на близькій відстані (рис. 1).

З урахуванням парціальної долі кожного із вказаних в таблиці 1 літологічних різновидів та отриманих середньомінімальних значень (медіана) K_d (таблиця 2) на підставі геологічних розрізів для 24 свердловин розраховані інтегральні значення K_d для ЗА в районі майданчика “Вектор”. Для забезпечення консервативності оцінки були виконані розрахунки медіанних значень.

На основі зазначених результатів можна розрахувати час затримки надходження РН у ґрунтовий водоносний горизонт внаслідок міграції в ЗА.

З цією метою був розрахований коефіцієнт затримки R , який характеризує ступінь зменшення конвективної і дифузійної міграції компонента

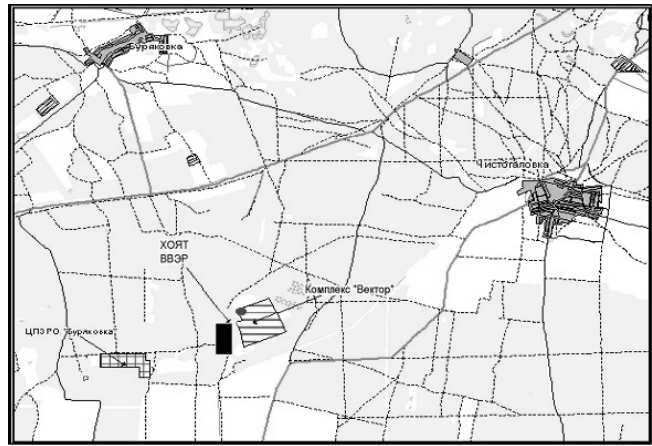


Рис. 1. Карта-схема району розміщення майданчиків

у пористому середовищі порівняно із швидкістю руху води.

$$R = 1 + \frac{\rho \cdot K_d}{n} \quad (1)$$

де ρ щільність ґрунтів зони аерації, n — вологість, об'ємних долей.

Таблиця 3. Інтегральні коефіцієнти розподілу (медіана) та коефіцієнти затримки для ЗА майданчика “Вектор”

Коефіцієнт розподілу K_d	^{90}Sr	^{137}Cs	^{239}Pu
	4,8	246	329
Коефіцієнт затримки R	66	3320	4450

ґрунтових вод $T_{\text{РН}}$ можна визначити як $T_{\text{РН}} = T_{\text{за}} \cdot R$ і відповідні значення складають 590 років для ^{90}Sr , 30000 років для ^{137}Cs і 40000 років для ізотопів плутонію.

Обговорення результатів. Отримані результати щодо часу міграції радіонуклідів через ЗА можуть викликати деякий подив, адже за загальноприйнятою точкою зору ґрунтовий водоносний горизонт у четвертинних відкладах у ближній зоні ЧАЕС є незахищеним від радіаційного забруднення. Однак порівняння з раніш виконаними експертними оцінками захисних властивостей ЗА дають підставу стверджувати, що піщані ґрунти ненасиченої зони аерації є досить дієвим природним бар'єром на шляху проникнення РН у підземні води. Так, отримана Є. А. Яковлевим орієнтовна оцінка часу проходження водорозчинними нуклідами товщі ЗА потужністю 5 — 10 м складає для ^{90}Sr 65 – 520 років [9].

Для ЗА, складеної виключно із м'яких пісків і пісків середньої крупності, був виконаний надзвичайно консервативний розрахунок об'єму забрудненої РН води, який може безпечно профільтрува-

тися через одиницю площі поперечного перерізу потоку при потужності слою ґрунтів 11 метрів [6]. Ці об'єми дорівнюють 17 м³, 1165 м³, 632 м³ для ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs і ²³⁹Pu відповідно.

Перерахунок цих даних на M = 14 метрів і $\epsilon = 200$ мм/рік = 200 л/(м²•рік) дає оцінку часу міграції радіонуклідів через зону аерації до рівня ґрунтових вод T_{рн}, який складає 108, 7400 та 4000 років, для відповідних РН. Слід підкреслити, що ці результати не враховують сорбційні властивості пилюватих пісків, супісків та суглинків, які складають біля 50% потужності ЗА і в основному визначають захисні властивості ненасиченої зони аерації.

Звичайно, вищезазначені оцінки не враховують багатьох факторів, які можуть впливати на швидкість міграції РН на майданчику "Вектор". Одним із таких факторів може бути наявність на згаданому майданчику так званих аномальних зон – западини, для яких відзначена підвищена швидкість міграції РН з поверхні до верхнього водоносного горизонту [10]. Ще одним фактором, дія якого на даний момент не визначена, є можлива зміна гідрохімічного режиму в ЗА внаслідок деструкції залізобетонних інженерних бар'єрів на етапі закриття сховища, що призведе до формування високих концентрацій Са і Na та призведе до підвищення рН у воді.

Відомо, що підвищення концентрацій катіонів Na⁺ і Са²⁺ зменшить ефективність сорбції ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr внаслідок конкурентного впливу цих катіонів [11]. Одночасно лужний характер розчинів може позитивно вплинути на підвищення сорбції гідроксильних сполук плутонію.

Висновки

1. З огляду на наведені розрахунки можна зазначити, що піщані ґрунти ненасиченої зони аерації в районі майданчика "Вектор" є досить дієвим природним бар'єром на шляху проникнення радіонуклідів у підземні води. Навіть найбільш консервативний розрахунок часу міграції радіонуклідів через зону аерації до рівня ґрунтових вод дає підстави стверджувати, що за цей час активність найбільш мобільного у природних умовах Полісся радіонукліда ⁹⁰Sr зменшиться як мінімум на порядок, а ¹³⁷Cs внаслідок радіоактивного розпаду не зможе дістатися до водоносного горизонту. Найменш ефективний захист ЗА забезпечує для довгоіснуючого ²³⁹Pu, зменшення активності якого складе лише 12—68%.

2. Внаслідок наявності глинистих мінералів, зосереджених у мілких фракціях піщаних ґрунтів ненасиченої зони аерації, комплекс "Вектор" має значний потенціал для безпечного розміщення кондиційованих твердих радіоактивних відходів, що утворюються як в процесі зняття з експлуатації енергоблоків ЧАЕС, так і під час експлуатації і зняття з експлуатації енергоблоків з ВВЕР, за рахунок сорбційних властивостей природного бар'єру, яким виступає ЗА.

3. Наведені розрахунки дають можливість більш обґрунтовано використовувати фактор затримки міграції радіонуклідів у ЗА в районі майданчика "Вектор" при визначенні межі активності, безпечної для розміщення радіоактивних відходів у поверхневих сховищах.

Список використаної літератури

1. Скальський А. С., Кубко Ю. И. Фильтрационные модели района ЧАЭС // Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Ч. 2. Моделирование водообмена и миграции радионуклидов в гидрогеологических структурах. Киев. 2000. – с. 462–494.
2. Бугай Д. А. Оценка водообмена подземных вод в ближней зоне ЧАЭС на основе данных изотопного датирования и гидрогеологического моделирования / Д. А. Бугай, Д. А. Э. Фурре., П. Жан-Батист, А. Даконьи, Д. Бомьер, К. Ле Галь, Ж. Ланселот, А. С. Скальський, Н. Ван Меер // Геологический журнал. — 2010. — №4. — с. 119—124.
3. Ольховик Ю. А. Естественный сорбционный барьер на этапе пассивного контроля площадки комплекса "Вектор" // Ядерна та радіаційна безпека. — 3(67). — 2015. — с. 43—48.
4. Ольховик Ю. О. Оцінка сорбційної здатності піщаних ґрунтів ближньої зони ЧАЕС / Ю. О. Ольховик, Т. І. Коромисличенко, Л. І. Горогоцька, Е. В. Собонович // Доповіді Академії наук України. Математика, природознавство, технічні науки. — 1992. — №7. — С. 167—171.
5. Ярмош І. В. Порівняльна оцінка значень коефіцієнтів розподілення ⁹⁰Sr на прикладі ґрунтів Чорнобильської зони відчуження // Ядерна енергетика та довкілля — № 2 (4). — 2014. — С. 40—46.
6. Шехтман Л. М. Оценка защитной способности от радиоактивных загрязнений геологической среды площадки комплекса "Вектор" в 30-километровой зоне ЧАЭС / Л. М. Шехтман, В. Т. Баранов, Г. Ф. Нестеренко, Е. А. Кишинская, В. М. Черная, Е. А. Яковлев // Проблемы Чернобыльской зоны отчуження. — 1996. — №3. — с. 143—145.
7. Будівництво Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР АЕС України. Науково-технічний звіт. Книга 2. Інженерно-геологічні роботи. Київський інститут інженерних вишукувань та досліджень "Енергопроект" — Київ. — 2015. — 96 с.
8. Инженерно-геологические изыскания для проекта строительства централизованного хранилища для

- долговременного хранения высокоактивных источников на КП “Вектор” в зоне отчуждения ЧАЭС. ЗАО “Черниговстройразведка”. — Чернигов. — 2009. — 88 с.
9. Яковлев Е. А. Оценка защитной способности почвогрунтов зоны азрации в границах радиогеохимического влияния Чернобыльской АЭС // Доклады 1 Все-союзного научно-технического совещания по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Чернобыль, 1989. — т.7 — №2. — с.126–140.
10. Бублясь В. Н., Шестопалов В. М. Аномальные зоны и их роль в перераспределении радионуклидов из поверхности почвы в подземные воды // Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Ч.1 Распространение чернобыльских радионуклидов в гидрогеологических структурах. Киев. — 2000. — с. 246 — 345.
11. Пшинко Г. Н. Сорбция-десорбция ^{137}Cs и ^{90}Sr в процессах миграции и дезактивации / Г. Н. Пшинко, С. А. Кобец, В. М. Федорова // Ядерна енергетика та довкілля.— 2014. — № 2(4). — С. 32—39.
10. Бублясь В. Н., Шестопалов В. М. Аномальные зоны

Получено 9.12.2015