

## Оцінка впливу сорбції в геологічному середовищі на допустиму активність радіоактивних відходів у приповерхневих сховищах

На прикладі приповерхневого сховища для захоронення радіоактивних відходів (РАВ) Лот 3 Комплексу виробництв «Вектор», розташованого в Чорнобильській зоні відчуження, розглянуто консервативний сценарій потенційного опромінення, який передбачає одночасне руйнування бар'єрів цього сховища з виходом радіонуклідів за його межі. Для аналізу зазначеного сценарію розроблено концептуальну модель, яка враховує міграцію радіонуклідів через зону аерації та водоносний горизонт до колодязя з питною водою, а також змішування інфільтраційних вод, що містять радіонукліди, з ґрунтовими водами в разі потрапляння до водоносного горизонту. Розраховано допустиму питому активність РАВ у сховищі за припущення, що РАВ містять лише радіонуклід  $^{90}\text{Sr}$ . Для розрахунків використано програмне забезпечення Normalysa.

**Ключові слова:** радіоактивні відходи,  $^{90}\text{Sr}$ , сорбція, міграція, коефіцієнт розподілення, зона аерації, водоносний горизонт, ґрунтові води, моделювання, ПЗ Normalysa.

**А. В. Токаревский, И. В. Ярмош**

### Оценка влияния сорбции в геологической среде на допустимую активность радиоактивных отходов в приповерхностных хранилищах

На примере приповерхностного хранилища для захоронения РАО Лот 3 Комплекса производств «Вектор», расположенного в Чернобыльской зоне отчуждения, рассмотрен консервативный сценарий потенциального облучения, который предусматривает одновременное разрушение барьеров этого хранилища с выходом радионуклидов за его границы. Для анализа указанного сценария разработана концептуальная модель, которая учитывает миграцию радионуклидов через зону аэрации и водоносный горизонт в колодец с питьевой водой, а также смешивание инфильтрационных вод, содержащих радионуклиды, с грунтовыми водами при попадании в водоносный горизонт. Рассчитана допустимая удельная активность РАО в хранилище при допущении, что РАО содержат только радионуклид  $^{90}\text{Sr}$ . Для расчетов использовано программное обеспечение Normalysa.

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы,  $^{90}\text{Sr}$ , сорбция, миграция, коэффициент распределения, зона аэрации, водоносный горизонт, грунтовые воды, моделирование, ПО Normalysa.

© О. В. Токаревський, І. В. Ярмош, 2017

Відповідно до Закону України «Про загальнодержавну цільову екологічну програму поводження з радіоактивними відходами» [1] та «Стратегії поводження з РАВ в Україні» [2] у Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ) на майданчику Комплексу виробництв «Вектор» (КВ «Вектор») передбачено будівництво приповерхневих сховищ для захоронення короткоживучих низько- та середньоактивних твердих радіоактивних відходів (РАВ), а також установок з переробки РАВ, сховищ для довгострокового зберігання РАВ і відпрацьованих джерел іонізуючого випромінювання. До майданчика КВ «Вектор» планується передати на захоронення практично всі РАВ України, що відповідають критеріям прийнятності для розміщення в приповерхневих сховищах, зокрема з державних міжобласних спеціалізованих комбінатів УкрДО «Радон», діючих АЕС України, Чорнобильської АЕС та ЧЗВ [3]. Тому вкрай важливо визначити максимальну радіологічну ємність КВ «Вектор» стосовно його спроможності безпечно утримувати нукліди.

Метою цієї роботи є попередня оцінка максимальної активності РАВ, що можуть бути безпечно захоронені в приповерхневих сховищах. Моделювання проведено на прикладі Спеціально обладнаного приповерхневого сховища твердих радіоактивних відходів КВ «Вектор» (сховище Лот 3).

У цій роботі розраховується максимальна допустима активність радіонуклідів, що можуть вийти за межі сховища. Розрахунок проведено за умови, що концентрація радіонуклідів у питній воді джерела споживання питної води (колодязя) не перевищує допустимих значень, наведених в НРБУ-97 [4].

Для досягнення зазначеної мети:

проаналізовано попередні дослідження за тематикою роботи;

проведено аналіз характеристик сховища та РАВ, які передбачається захоронювати в ньому;

зібрано інформацію та визначено характеристики об'єктів навколишнього середовища (ґрунтів, водоносних горизонтів тощо);

розроблено модель, яка описує міграцію радіонуклідів від сховища до колодязя;

розроблено базовий сценарій для моделювання;

визначено вихідні дані та припущення для моделювання;

виконано моделювання за допомогою програмного забезпечення Normalysa (ПЗ Normalysa);

проведено варіацію ключових параметрів моделі на основі базового сценарію.

**Аналіз попередніх досліджень.** Питанню визначення максимальної допустимої загальної активності РАВ у сховищах КВ «Вектор», зокрема Лот 3, присвячено ряд робіт [5, 6].

У Звіті з аналізу безпеки Лоту 3 [5] використано спрощену одновимірну модель міграції радіонуклідів у геологічному середовищі. Введені у Звіт для моделювання певні припущення, зокрема щодо радіонуклідного складу та значень коефіцієнтів розподілення ( $K_d$ ), є недостатньо обґрунтованими та не узгоджуються з літературними даними, зокрема з порівняльною оцінкою значень  $K_d$  для ґрунтів Чорнобильської зони відчуження [7].

Запропонована в [6] концептуальна балансова модель розрахунку максимальної активності радіонуклідів на прикладі сховища Лот 3, згідно з якою шари ґрунтів зони аерації та водоносного горизонту представлені у вигляді блоків, однорідних за своїми фізико-хімічними властивостями, не враховує деякі параметри, зокрема динамічні характеристики процесу міграції радіонуклідів у геологічному середовищі.

З огляду на це, авторами статті запропоновано підхід з використанням ПЗ Normalysa, який позбавлено зазначених недоліків. Модель описує міграцію радіонуклідів (на прикладі  $^{90}\text{Sr}$ ) у зоні аерації та водоносному горизонті від місця розміщення РАВ у сховищі Лот 3, спорудженому на майданчику КВ «Вектор», до колодязя з питною водою. В моделі, зокрема, враховано час, за який радіонукліди досягають колодязя, кліматичні характеристики, вологість ґрунту.

**Комплекс виробництв «Вектор» (сховище Лот 3 та інші).** На КВ «Вектор» планується створення приповерхневих сховищ для захоронення РАВ [8] як у контейнерах (наприклад, сховища Лот 3 та ТРВ-1), так і навалом (наприклад, сховище ТРВ-2).

На сьогоднішній день на КВ «Вектор» введено до експлуатації лише сховище Лот 3, яке призначене для захоронення кондиціонованих твердих РАВ та має проектну місткість  $50\ 210\ \text{м}^3$  РАВ. Це сховище складається з двох паралельних секцій, кожна з яких має 11 залізобетонних відсіків (модулів) [5]. На цей час дозволено експлуатацію двох відсіків сховища [9] та узгоджено критерії приймання РАВ до них [10]. На Лот 3 мають захоронюватись як РАВ від експлуатації та зняття з експлуатації діючих АЕС України, так і РАВ чорнобильського походження. Радіонуклідний склад цих РАВ може бути різноманітним (з огляду на значні обсяги РАВ чорнобильського походження); проте передбачається, що основну масу складатимуть РАВ з радіонуклідами  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$ . У [10] встановлено допустимі питомі активності для радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  —  $7,78 \cdot 10^5$  Бк/г та  $2,88 \cdot 10^5$  Бк/г відповідно, але вказано, що ці значення потребують перегляду з різних причин. При цьому вміст довгоіснуючих радіонуклідів у сховищі лімітується встановленими критеріями приймання [10].

РАВ у сховищі Лот 3 планується розмішувати в контейнерах та бочках, які складаються пошарово. Кожен заповнений бочкою шар заливається цементним розчином для фіксації упаковок. Після заповнення всіх відсіків сховища виконується обвалування [5].

**Гідрогеологічні особливості та структура інженерно-геологічних елементів у районі розташування сховища Лот 3 КВ «Вектор».** Дані щодо будови геологічного розрізу під різними сховищами для захоронення на майданчику «Вектор», глибини залягання та потужності водоносних горизонтів, швидкості та напрямку руху ґрунтових вод у районі майданчика «Вектор» є неповними та характеризуються значними варіаціями.

Особливості гідрогеологічних умов території КВ «Вектор» визначаються її геоморфологічною приуроченістю до вододілу долин річок Прип'ять та Уж.

До глибини 25 м повсюдне поширення має четвертинний водоносний горизонт (ґрунтові води), приурочений до товщі середньочетвертинних флювіогляціальних відкладень. Водовмісними породами є піски різного гранулометричного складу з прошарками супісків та суглинків (рис. 1) [11]. Ґрунтові води зафіксовано на різних глибинах від поверхні, зокрема для Лоту 3 — від 15 до 21 м. Основним джерелом живлення водоносного горизонту є атмосферні опади [5].

**Коефіцієнт розподілення радіонуклідів.** Одним із процесів, який визначає міграцію радіонукліда в геологічному середовищі, є процес сорбції (десорбції) на твердій фазі. Цей процес характеризується коефіцієнтом розподілення радіонукліда  $K_d$  між твердою та рідкою фазами, який визначається відношенням питомих активностей радіонукліда:

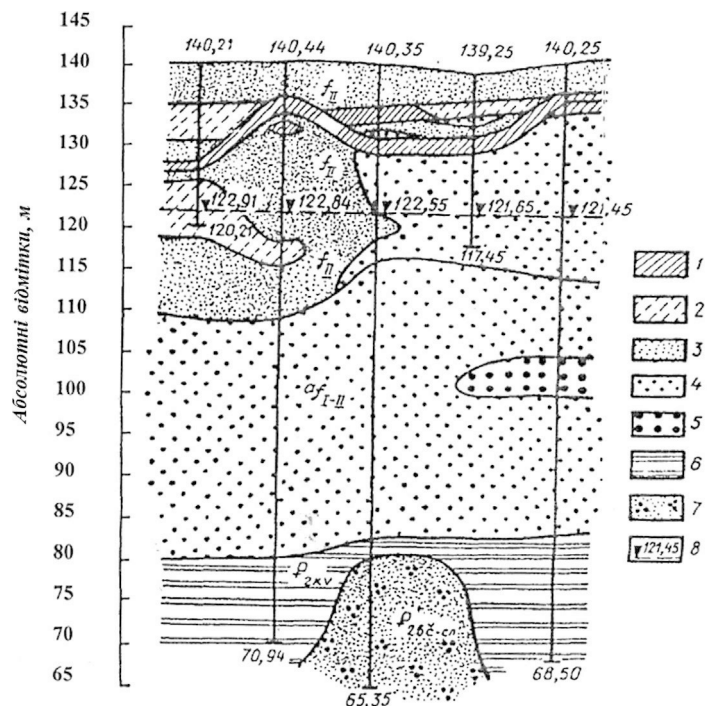


Рис. 1. Геологічний розріз ділянки майданчика комплексу «Вектор»:

1 — суглинок моренний і флювіогляціальний; 2 — супісок флювіогляціальний; 3 — пісок дрібний флювіогляціальний; 4 — пісок середньої крупності флювіогляціальний й алювіально-флювіогляціальний; 5 — пісок крупний алювіально-флювіогляціальний; 6 — глина мергельна київської світи палеогену; 7 — пісок дрібний глауконітовий бучацько-канівської світи палеогену; 8 — позначка рівня підземних вод

$$K_d = \frac{A_s}{A_w}, \quad (1)$$

де  $A_s$  — питома активність радіонукліда в твердій фазі ґрунту, Бк/г;  $A_w$  — об'ємна активність радіонукліда у водній фазі, Бк/мл [12].

Чим більше значення  $K_d$  радіонукліда, тим повільніше відбувається його міграція за рівнозначних умов.

Значення  $K_d$  залежать від численних геохімічних параметрів і процесів: рН розчину, мінерального складу, наявності органічних речовин, оксидів заліза, умов окислення / відновлення, хімічної форми радіонукліду тощо [13].

Більше того, внаслідок мінливості мінерального складу ґрунтів, значення  $K_d$  нерідко значно змінюються навіть у межах невеликих ділянок досліджуваної території [14].

**Опис та представлення запропонованої моделі.** У моделюванні процесів міграції радіонуклідів у геологічному середовищі використано ПЗ Normalysa — набір моделей та баз даних, призначених для оцінки радіологічних впливів від радіоактивних матеріалів природного походження та «історичних» сховищ РАВ. Ці моделі є відносно простими і можуть служити на ранніх стадіях оцінки для ідентифікації найбільш важливих шляхів транспортування радіонуклідів та опромінення населення. З огляду на високий ступінь невизначеності даних щодо сховища Лот 3, автори вважають доцільним застосування ПЗ Normalysa для попередньої оцінки максимальної активності радіонуклідів у цьому сховищі.

**Сценарій потенційного опромінення.** Рекомендаційним документом [15] визначено, що завантаження РАВ у сховища

КВ «Вектор» відбуватиметься орієнтовно протягом 200 років від початку надходження перших партій РАВ на майданчик, а протягом наступних 300 років здійснюватиметься активний адміністративний контроль закритих сховищ із захороненими РАВ [3]. Після того, як мине 300 років з моменту закриття сховища, можливе руйнування інженерних бар'єрів, зокрема верхнього накриття та бетонної основи сховища. Наслідком цього може бути вихід радіонуклідів через підстеляючі породи зони аерації до водоносного горизонту та їхня подальша міграція з ґрунтовими водами.

Міграція радіонуклідів у геологічному середовищі обумовлюється значною кількістю взаємопов'язаних фізико-хімічних процесів, що відбуваються в системі «газова фаза (в зоні аерації) — водний розчин — вміщуюча порода». Внаслідок складності цих процесів для опису поведінки радіонуклідів доцільно використовувати методи математичного моделювання [16].

Щоб компенсувати невизначеності вихідних даних для моделювання, розглянуто такий надзвичайно консервативний сценарій потенційного опромінення людини:

критичні події або комбінації критичних подій, які спричинені надзвичайними ситуаціями, призводять до одночасного руйнування всіх інженерних бар'єрів Лоту 3, а всередину сховища потрапляє вода в об'ємі, що відповідає максимальній добовій кількості опадів [17];

відбувається одночасний вихід радіонуклідів у водорозчинній формі до водоносного горизонту через ґрунти зони аерації;

у водоносному горизонті інфільтрована вода змішується з ґрунтовими водами (зона змішування у водоносному горизонті);

радіонукліди мігрують з ґрунтовими водами у напрямку колодязя та потрапляють до нього (зона транспортування у водоносному горизонті);

відбувається споживання забрудненої води з колодязя.

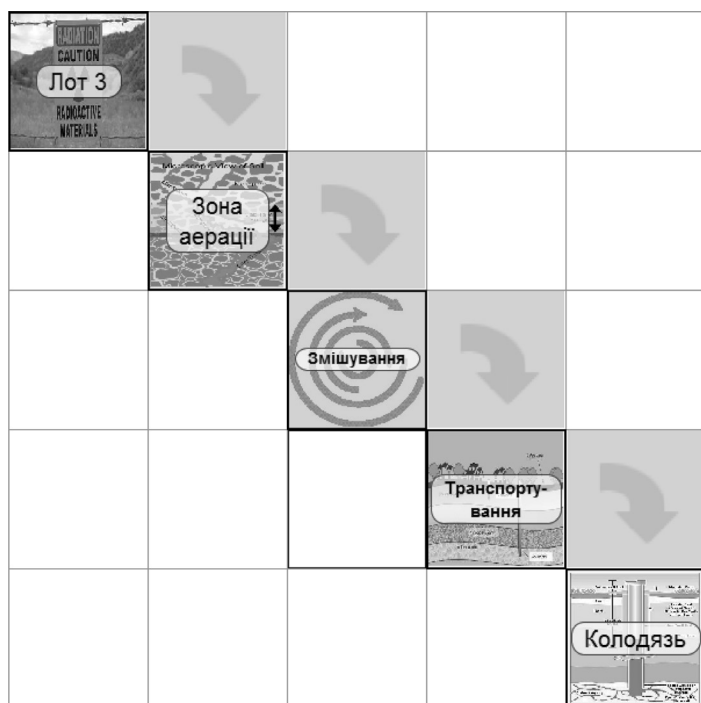


Рис. 2. Представлення в ПЗ Normalysa ілюстративної блокової моделі міграції радіонуклідів зі сховища Лот 3

Модель міграції радіонуклідів, побудована за допомогою ПЗ Normalysa, наведено на рис. 2.

**Вихідні дані та припущення для моделювання.** В моделі використано такі вихідні дані:

габаритні розміри відсіку сховища — 18,8 м×24,8 м×7,5 м; компоновка сховища — два ряди по 11 відсіків [5]; відповідно розміри сховища — 206,8 м×49,6 м×7,5 м;

період адміністративного контролю сховища після його закриття — 300 років [18, 19];

допустима концентрація  $^{90}\text{Sr}$  у питній воді —  $10^4$  Бк/м<sup>3</sup> [4]; перший водоносний горизонт переважно складається з піску середньої крупності (див. рис. 1) [11], густина та пористість якого 2,01 г/см<sup>3</sup> та 37,5 % відповідно [20, 21]; густина ґрунту в зоні аерації — 1,95 г/см<sup>3</sup> [20];

швидкість руху потоку ґрунтових вод — 44 м/рік [22]; максимальна добова кількість опадів — 76 мм [17].

Для моделювання прийнято такі припущення:

1. Через 300 років після закриття сховища відбувається миттєве руйнування інженерних бар'єрів з одночасним виходом радіонуклідів у водорозчинній формі зі сховища в підстеляючі породи.

2. У сховищі міститься тільки один радіонуклід ( $^{90}\text{Sr}$ ).

3. Швидкість інфільтрації всередину Лоту 3 відповідає максимальній добовій кількості опадів.

4. Модель складається з ряду блоків, через які відбувається міграція радіонуклідів (див. рис. 2). Склад, фізичні та хімічні властивості кожного з блоків є однорідними по всьому його об'єму. РАВ рівномірно розподілені по всьому об'єму Лоту 3. Ґрунти зони аерації для спрощення моделі розглядаються як єдиний блок. Характеристики цього блока (пористість, густина,  $K_d$  тощо) розраховані усередненням відповідних характеристик основних порід зони аерації з урахуванням приблизної товщини шару кожної породи, наведеної в [6], де розглядаються (узагальнено) три шари підстеляючих ґрунтів: дрібний кварцовий пісок (товщина 7,5 м), червоно-бурий супісок (товщина 1,5 м) та дрібнозернистий пісок з лінзами глини (товщина шару 10 м) [6].

5. Інфільтраційні води, що містять радіонукліди, змішуються з ґрунтовими водами в шарі водоносного горизонту потужністю 5 м (зона змішування) та розмірами в плані, що відповідають розмірам Лоту 3.

6. Радіонукліди переносяться від зони змішування до місця розташування колодязя в шарі водоносного горизонту потужністю 5 м, який є однорідним за фізико-хімічними властивостями.

7. Коефіцієнт розподілення  $^{90}\text{Sr}$  для ґрунту водоносного горизонту — 4,1 мл/г, для ґрунту зони аерації — 3,4 мл/г [6].

8. Для блоків, що описують вертикальну міграцію, площа горизонтального перерізу блока відповідає площі Лоту 3 (довжина×ширина), а висота блока дорівнює товщині шару. Для блоків, що описують горизонтальну міграцію, висота блока відповідає товщині (потужності) шару водоносного горизонту, в якому відбувається перенесення радіонуклідів, ширина — довжині Лоту 3, а довжина — відстані від Лоту 3 до колодязя.

9. Питна вода споживається з колодязя, розташованого на відстані 1 км від Лоту 3.

10. Розглядається споживання питної води з першого водоносного горизонту.

**Результати моделювання.** За результатами розрахунку в ПЗ Normalysa визначено, що оціночне значення питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  у складі РАВ, яку можна безпечно захоронити в приповерхневому сховищі Лот 3, становить  $3,35 \cdot 10^{10}$  Бк/кг.

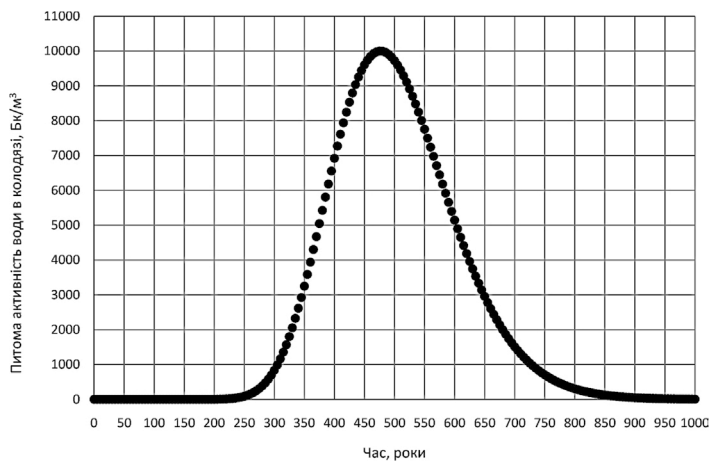


Рис. 3. Зміна концентрації  $^{90}\text{Sr}$  у питній воді колодязя з часом (питома активність  $^{90}\text{Sr}$  у сховищі Лот 3 —  $3,35 \cdot 10^{10}$  Бк/кг)

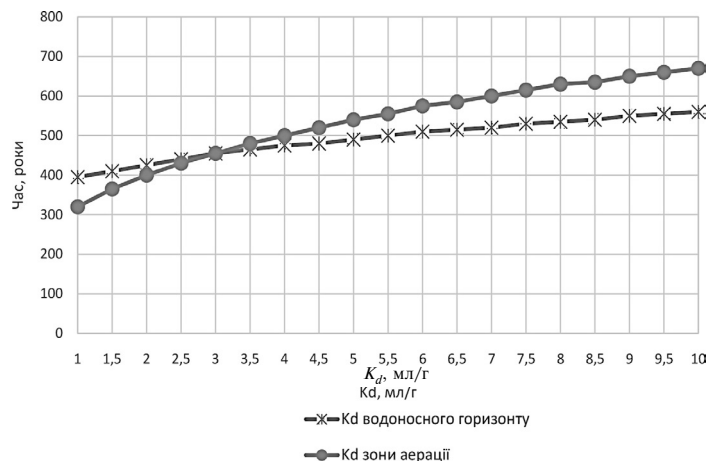


Рис. 5. Залежність часу досягнення радіонуклідами колодязя від  $K_d$

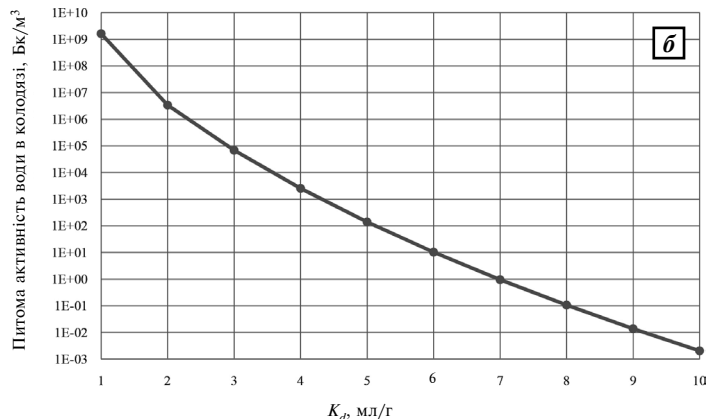
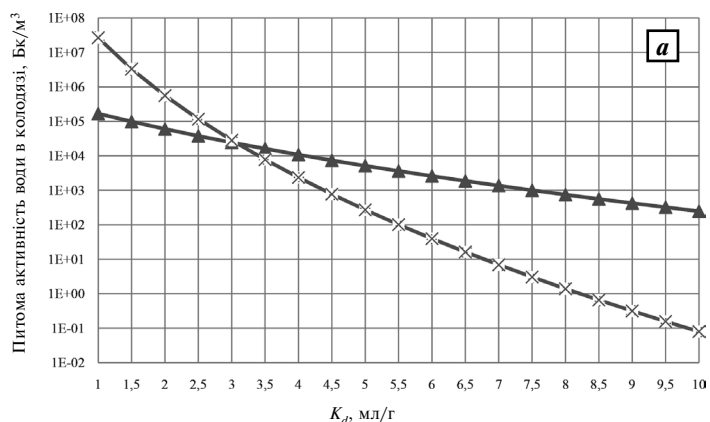


Рис. 4. Залежність концентрації  $^{90}\text{Sr}$  у питній воді колодязя від  $K_d$ :

*a* — варіація  $K_d$  зони аерації або водоносного горизонту (— $\circ$ — концентрація  $^{90}\text{Sr}$  у колодязі залежно від варіації  $K_d$  для ґрунтів водоносного горизонту; — $\times$ — те саме, для ґрунтів зони аерації); *б* — одночасна варіація  $K_d$  зони аерації та водоносного горизонту

Розрахунок проведено з метою визначення активності радіонуклідів за умови неперевикнення допустимого значення концентрації  $^{90}\text{Sr}$  у питній воді ( $10^4$  Бк/м<sup>3</sup>) і фіксованих значень  $K_d$   $^{90}\text{Sr}$  для ґрунтів зони аерації та водоносного

горизонту (3,4 мл/г та 4,1 мл/г відповідно). Розрахунковий час досягнення радіонуклідами колодязя становить 475 років з моменту їхнього виходу зі сховища (рис. 3).

Щоб оцінити чутливість моделі до параметра  $K_d$  радіонукліда  $^{90}\text{Sr}$ , проведено три серії розрахунків:

- 1) з варіацією значень  $K_d$  для ґрунтів зони аерації від 1 до 10 мл/г (з кроком 0,5) та фіксованим значенням  $K_d$  для ґрунтів водоносного горизонту (4,1 мл/г);
- 2) з варіацією значень  $K_d$  для ґрунтів водоносного горизонту від 1 до 10 мл/г (з кроком 0,5) та фіксованим значенням  $K_d$  для ґрунтів зони аерації (3,4 мл/г);
- 3) з одночасною варіацією значень  $K_d$  для ґрунтів зони аерації та водоносного горизонту від 1 до 10 мл/г (з кроком 1).

З отриманих результатів (рис. 4, *a*, *б*) видно, що модель є дуже чутливою до  $K_d$ . Із змінням  $K_d$  ґрунтів водоносного горизонту на один порядок питома активність води в колодязі змінюється на три порядки, а в разі аналогічної зміни  $K_d$  ґрунтів зони аерації — на вісім порядків (рис. 4, *a*) за умови фіксованого значення активності у сховищі. Крім того, виявилось, що модель є значно чутливішою до  $K_d$   $^{90}\text{Sr}$  для ґрунтів зони аерації, ніж до  $K_d$  для ґрунтів водоносного горизонту.

Із графіка залежності часу досягнення радіонуклідами колодязя від  $K_d$  (рис. 5) видно, що час досягнення колодязя збільшується із збільшенням  $K_d$ . Тому для короткоіснуючих радіонуклідів (таких як  $^{90}\text{Sr}$ ) важливим з точки зору забезпечення радіаційної та екологічної безпеки є збільшення шляху міграції радіонуклідів та часу досягнення ними зони розвантаження ґрунтових вод. Це обумовлено тим, що навіть за кілька десятків років активність таких радіонуклідів суттєво зменшується.

## Висновки

1. Метою моделювання був оціночний розрахунок максимальної допустимої активності РАВ у сховищі Лот 3, за якої питома активність води в колодязі не перевищуватиме встановлені нормативними документами значення, а також розрахунок часу, через який питома активність води в колодязі буде максимальною. Моделювання виконувалося за припущення, що у сховищі міститься тільки один радіонуклід —  $^{90}\text{Sr}$ .

Результати моделювання показали, що максимальна допустима питома активність  $^{90}\text{Sr}$  у сховищі Лот 3, з урахуванням прийнятих консервативних припущень, становить  $3,35 \cdot 10^{10}$  Бк/кг; у цьому разі максимальне значення питомої активності води в колодязі буде досягнуто через 475 років після виходу радіонуклідів за межі сховища.

2. За результатами аналізу чутливості моделі до варіації  $K_d$   $^{90}\text{Sr}$  у зоні аерації та/або водоносному горизонті, із зміненням  $K_d$  на один порядок питома активність води в колодязі змінюється на кілька порядків за умови фіксованого значення активності у сховищі. Крім того, модель є значно чутливішою до  $K_d$  для ґрунтів зони аерації, ніж до  $K_d$  для ґрунтів водоносного горизонту.

3. З огляду на отримані результати моделювання, які показали, що такі параметри, як швидкість міграції радіонуклідів та питома активність води в колодязі є вкрай чутливими до зміни  $K_d$ , ще актуальнішим постає питання отримання коректних значень  $K_d$  для ґрунтів майданчика Лот 3 та навколо нього на шляху міграції радіонуклідів.

4. За умови наявності коректних значень  $K_d$  для ґрунтів розташування сховища, результати моделювання можна поширити й на інші сховища майданчика «Вектор». Запропонований підхід можна також використовувати в обґрунтуванні безпеки нових та «історичних» сховищ для захоронення РАВ. Водночас треба враховувати та аналізувати сумарний радіологічний вплив усіх нуклідів, присутніх у РАВ конкретних сховищ для захоронення.

### Список використаної літератури

1. Про Загальнодержавну цільову екологічну програму поводження з радіоактивними відходами : Закон України. *Відомості Верховної Ради України*. 2009. № 5.

2. Стратегія поводження з радіоактивними відходами в Україні : Затвердж. розпорядженням КМ України від 19.08.2009 № 990-р. [Електронний ресурс]. Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/990-2009-%D1%80>

3. Порядок звільнення радіоактивних матеріалів від регулюючого контролю у рамках практичної діяльності (НП 306.4.159–2010) : Затвердж. наказом Держатомрегулювання від 01.07.2010 № 84; зареєстр. в Мін'стї 20.08.2010 за № 718/18013. К. : Державний комітет ядерного регулювання України, 2010. 17 с.

4. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. К. : Укр. центр держсанепіднагляду МОЗ України, 1997. 125 с.

5. Отчет по анализу безопасности СОПХТРО. Ред. 1. Дополнения и изменения. Ред. 2. Главы 1–6. ГСП «Техноцентр», 2009. 228 с.

6. Iarmosh I., Olkhovuk Yu. (2016) “Conceptual Model to Determine Maximum Activity of Radioactive Waste in Near-Surface Disposal Facilities”, *Nuclear and Radiation Safety*, No. 3 (71), pp. 61–64.

7. Ярмош І. В. Порівняльна оцінка значень коефіцієнтів розподілення  $^{90}\text{Sr}$  на прикладі ґрунтів Чорнобильської зони відчуження. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2014. № 2 (4). С. 40–46.

8. Доработка и внесение изменений в ТЭО инвестиций II очереди комплекса производств «Вектор» (ЦПЗ) в связи с изменениями нормативной базы. Том 2 : Оценка воздействия на окружающую среду. Кн. : Пояснительная записка. Желтые Воды : НТЦ КОРО, 2007. 194 с.

9. Офіційний сайт ДСП «ЧАЕС». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://chnpp.gov.ua/ru/ЧАЕС>

10. Поводження з радіоактивними відходами. Критерії приймання радіоактивних відходів на захоронення в спеціально обладнаному приповерхневому сховищі твердих радіоактивних відходів (СОПСТРВ). Перший етап експлуатації СОПСТРВ. Приймання РАВ від ЗПРРВ та ЗПТРВ ДСП ЧАЕС для захоронення в два симетричних відсіки СОПСТРВ. Ред. 5 / ДК «УкрДО “Ра-

дон”», ДСП «Центр переробки та захоронення техногенних відходів «Техноцентр». Чорнобиль. 33 с.

11. Шехтман Л.М., Баранов В. Т., Нестеренко Г. Ф., Кишинская Е. А., Черная В. М., Яковлев В. А. Оценка защитной способности от радиоактивных загрязнений геологической среды площадки комплекса «Вектор» в 30-километровой зоне ЧАЭС. *Проблеми Чорнобильської зони відчуження*. К. : Наук. думка, 1996. Вип. 3. С. 134–145.

12. Бондаренко Г. Н., Кононенко Л. В., Колябина И. Л. Кинетика формообразования радионуклидов в почвах как ключевой фактор прогнозирования экологического состояния природной среды. К. : Наук. думка, 2014. 202 с.

13. Soil Screening Guidance for Radionuclides: Technical Background Document / U.S. Environmental Protection Agency. Publication 9355.4–16. 2000. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.epa.gov/superfund/health/contaminants/radiation/pdfs/sstbd.pdf>

14. Дунаева А. Н. Физико-химическое моделирование сорбции радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ ) в системе «природные воды — глинистые минералы» : дисс. ... канд. хим. наук : 25.00.09. М., 2001. 115 с.

15. Керівництво з оцінки загального впливу майданчика «Вектор» з багатьма об'єктами, призначеними для переробки, зберігання та захоронення радіоактивних відходів. Підзавдання Іа. Проект INSC UK/TS/39.

16. Истомин А. Д., Кораблева С. А., Носков М. Д. Математическое моделирование миграции в поверхностном слое грунта. *Известия Томского политехнического университета*. 2005. Т. 308, № 3. С. 74–78.

17. Технико-экономическое обоснование Центра по переработке и захоронению РАО низкой и средней активности на базе комплекса производств «Вектор» / НТЦ “КОРО” Минчернобыля Украины. В 6 т. Желтые Воды, 1995. Т. 1, 2.

18. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ДСП 6.177–2005–09–02) : Затверджено наказом Міністерства охорони здоров'я України від 02.02.2005 № 54, зареєстровано в Міністерстві юстиції України 20.05.2005 за № 552/10832. *Офіційний вісник України*. 2005. № 23. Стор. 197. Ст. 1322. Код акту 32646/2005.

19. Classification of Radioactive Waste, No. GSG-1., Vienna : IAEA, 2009. 68 p.

20. Строительство Централизованного хранилища для долгосрочного хранения отработанных источников ионизирующего излучения. Проект. Т. 7. Отчет по анализу безопасности. К-1216-ОАБ. 2010. 97 с.

21. Матеріали інженерно-геологічних изысканий по комплексу «Вектор», проект площадки «Северная» (пункт Бурыковка) / КИЭП. 1992.

22. Атлас Чорнобильської Зони відчуження. К. : Наук.-вироб. підприємство «Картографія», 1996. 26 с.

### References

1. Law of Ukraine “On State Targeted Ecological Program of Radioactive Waste Management” [Zakon Ukrainy “Pro zahalnodержavnu tsiliovu ekolohichnu prohramu povodzhennia z radioaktivnyumu vidkhodamy], *Journal of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 2009, No. 5. (Ukr)

2. Strategy of Radioactive Waste Management in Ukraine [Stratehiia povodzhennia z radioaktivnyumu vidkhodamy Ukrainy], Approved by Cabinet Resolution No. 990-r dated 19 August 2009, available at: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/990-2009-%D1%80>

3. NP 306.4.159–2010. Procedure for Release of Radioactive Material from Regulatory Control within Practical Activities [NP 306.2.145–2008. Poriadok zvilnennia radioaktivnykh materialiv vid rehuliuuichoho kontroliu v ramkakh praktychnoi diialnosti], Approved by SNRIU Order No. 84 dated 01 July 2010 and Registered in the Ministry of Justice of Ukraine under No. 718/18013 dated 20 August 2010, Kyiv, State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine, 2010, 17 p. (Ukr)

4. NRB-97. Radiation Safety Standards of Ukraine. State Health and Safety Regulations [Normy radiatsiinoi bezpeky Ukrainy

- (NRBU-97). Derzhavni hihienichni normatyvy], Kyiv, Ukrainian Center for Health and Safety Control, Ministry of Health of Ukraine, 1997, 125 p. (Ukr)
5. Safety Analysis Report for ENSDF [Otchiot po analizu bezopasnosti SOPKhTRO], Revision 1, Addition and Changes, Revision 2, Chapters 1-6, Tekhnocenter, 2009, 228 p. (Rus)
6. Iarmosh, I., Olkhovyk, Yu. (2016) "Conceptual Model to Determine Maximum Activity of Radioactive Waste in Near-Surface Disposal Facilities", Nuclear and Radiation Safety, No. 3 (71), pp. 61–64.
7. Yarmosh, I. V. (2014), "Comparative Assessment of  $^{90}\text{Sr}$  Distribution Coefficients by Example of Chernobyl Exclusion Zone Soils" [Porivnialna otsinka znachen koefitsientiv rozpodilennia  $^{90}\text{Sr}$  na prykladi gruntiv Chornobylskoi zony vidchuzhennia], Nuclear Energy and Environment, No. 2 (4), pp. 40–46. (Ukr)
8. Revision and Correction of Feasibility Study for Investments of Stage II of Vector Complex Regarding Changes in the Regulatory Framework, Volume 2: Assessment of Impact on the Environment [Dorabotka i vneseniie izmenenii v TEO investitsii II ocheredi kompleksa proizvodstv "Vektor" (TsPZ) v svyazi s izmeneniami normativnoi bazy. Tom 2: Otsenka vozdeistviia na okruzhaiushchiuiu srediu], Explanatory Note, Zhovti Vody, KORO, 2007, 194 p. (Rus)
9. Official Web-Site of Chernobyl NPP, available at: <http://chnpp.gov.ua/ru/ЧАЕС>
10. Radioactive Waste Management. Criteria for Radioactive Waste Acceptance for Disposal in the Engineered Near-Surface Disposal Facility (ENSDF). ENSDF First Stage of Operation. Radioactive Waste Acceptance for ChNPP LRTP and SRTP to be Disposed in Two Symmetrical Sections of ENSDF [Povodzhennia z radioaktyvnymy vidkhodamy. Kryterii pryimannia radioaktyvnykh vidkhodiv na zakhoronennia v spetsialno obladanomu prypoverkhnevomy skhovyshchi tverdykh radioaktyvnykh vidkhodiv (SOPSTRV). Pershyi etap ekspluatatsii SOPSTRV. Pryimannia RAV vid ZPRRV and ZPTRV DSP CHAES dlia zakhoronennia v dva symetrychnykh vidsiky SOPSTRV], Rev. 5, UkrDO Radon, Tekhcenter, Chornobyl, 33 p. (Ukr)
11. Shekhtman, L. M., Baranov, V. T., Nesterenko, H. F., Kishinskaia, Ye. A., Chiornaia, V. M., Yakovlev, V. A. (1996), "Assessment of Protective Abilities of Vector Complex Geology against Radioactive Contamination in 30-km ChNPP Area" [Otsenka zashchitnoi sposobnosti ot radioaktivnykh zagriaznenii geologicheskoi sredei ploshchadki kompleksa "Vektor" v 30-kilometrovoy zone ChAES], Problems of Chernobyl Exclusion Zone, Kyiv, Naukova Dumka, No. 3, pp. 134–145. (Rus)
12. Bondarenko, G. N., Kononenko, L. V., Koliabina, I. L. (2014), "Kinetics of Radionuclide Generation in Soils as a Key Factor of Predicting Environmental Conditions" [Kinetika formoobrazovaniia radionuklidov v pochvakh kak kliuchevoi faktor prognozirovaniia ekologicheskogo sostoianniia prirodnoi sredei], Kyiv, Naukova Dumka, 202 p. (Rus)
13. Soil Screening Guidance for Radionuclides, Technical Background Document, U.S. Environmental Protection Agency, Publication 9355.4-16, 2000, available at: <http://www.epa.gov/superfund/health/contaminants/radiation/pdfs/sstbd.pdf>
14. Dunaiova, A. N. (2001), "Physical and Chemical Modeling of Sorption of Radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ ) in the System "Natural Water – Clay Matter" [Fiziko-khimicheskoiie modelirovaniie sorbstsii radionuklidov ( $^{137}\text{Cs}$  i  $^{90}\text{Sr}$ ) v sisteme "prirodnyie vody – glinistyie mineraly"], Ph.D. in Chemical Sciences, 25.00.09, Moscow, 115 p. (Rus)
15. Guideline on Assessment of General Impact of Vector Complex with Multiple Objects Aimed at Processing, Storage and Disposal of Radioactive Waste [Kerivnystvo z otsinky zahalnoho vplyvu maidanchyka "Vektor" z bahatma ob'ektamy, pryznachenyi dlia pererobky, zberihannia ta zakhoronennia radioaktyvnykh vidkhodiv], Subtask 1a, UK/TS/39 INSC Project. (Ukr)
16. Istomic, A. D., Korabliova, S. A., Noskov, M. D. (2005), "Mathematical Modeling of Migration in Near-Surface Soil Layer" [Matematicheskoiie modelirovaniie migratsii v poverkhnostnom sloie grunta], News of Tomsk Polytechnical University, V. 308, No. 3, pp. 74–78. (Rus)
17. Feasibility Study of the Center for Processing and Disposal of Low-Level and Intermediate-Level Radioactive Waste at Vector Complex [Tekhniko-ekonomicheskoiie obosnovaniie Tsentra po pererabotke i zakhoroneniui RAO nizkoi i srednei aktivnosti na baze kompleksa proizvodstv "Vektor", KORO, 6 Volumes, Zhovti Vody, 1995, V. 1, 2. (Rus)
18. DSP 6.177-2005-09-02. "Basic Health and Safety Rules of Radiation Safety in Ukraine" [DSP 6.177-2005-09-02. Osnovni sanitarni pravyla zabezpechennia radiatsiinoi bezpeky Ukrainy], Approved by Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 54 dated 02 February 2005 and Registered in the Ministry of Justice of Ukraine under No. 552/10832 dated 20 May 2005, Official Journal of Ukraine, No. 23, Art. 1322, 197 p. (Ukr)
19. Classification of Radioactive Waste, No. GSG-1, Vienna, IAEA, 2009, 68 p.
20. Construction of the Centralized Storage Facility for Long-Term Storage of Spent Radiation Sources [Stroitelstvo Tsentralizovannogo khranilishcha dlia dolgosrochnogo khraneniia otrabotannykh istochnikov ioniziruiushchego izlucheniia], Draft, V. 7, Safety Analysis Report, K-1216-OAB, 2010, 97 p. (Rus)
21. Proceedings of Engineering and Geological Studies of Vector Complex, Severnaia Site Design (Buriakovka Point) [Materialy inzhenerno-geologicheskikh izyskaniia po kompleksu "Vektor", proekt ploshchadki "Severnaia" (punkt Buriakovka)], KIEP, 1992. (Rus)
22. Atlas of Chernobyl Exclusion Zone [Atlas Chornobylskoi Zony vidchuzhennia], Kyiv, Kartohrafiia Enterprise, 1996, 26 p. (Ukr)

Отримано 14.03.2017.