

УДК 502.75:001.57(045)

¹Ю.О. Кутлахмедов, д.б.н., проф.
²А.Г. Бевза, асист.

МОДЕЛЮВАННЯ МІГРАЦІЇ РАДІОНУКЛІДІВ У СИСТЕМІ БІОЛОГІЧНИХ СТАВКІВ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Національний авіаційний університет

¹E-mail: ecoetic@yandex.ru²E-mail: bevza_a_g@ukr.net

Досліджено процес міграції радіонуклідів, що потрапили з атомної електростанції в систему біологічних ставків та потім до водойми-охолоджувача. Розглянуто моделювання процесу міграції радіонуклідів у системі біологічних ставків на прикладі Південноукраїнської атомної електростанції за допомогою методу камерних моделей. За основу взято типову водну екосистему, що складається з трьох камер: вода, біота та донні відклади. Розроблено динамічну камерну модель міграції радіонуклідів у біологічних ставках атомної електростанції, яка дозволяє за обмеженими даними з моніторингу екосистем прогнозувати динаміку забруднення водойм радіонуклідами. Змодельовано параметри радіоекологічної ємності системи біоставків та водойми-охолоджувача атомної електростанції. Зроблено оцінку і прогноз розподілу і накопичення концентрації радіонуклідів у системі біологічних ставків атомної електростанції. Показано роль води, біомаси та донних відкладень водойм у депонуванні радіонуклідів.

Ключові слова: атомна електростанція, біологічний ставок, водойма-охолоджувач, екосистема, метод камерних моделей, радіонуклід.

Постановка проблеми

Питання безпеки та надійності атомної енергетики в Україні та світі є дуже актуальним.

Експлуатація атомних електростанцій (АЕС) створює ряд факторів негативного впливу на навколишнє середовище:

- викид в атмосферу радіоактивних речовин (продуктів ділення ядер урану);
- надходження в атмосферу вентиляційного повітря (викиди), забрудненого радіоактивними речовинами, та скиди охолоджувальної води у водойми;
- забруднення ґрунту і води при викидах та скидах радіоактивних речовин;
- наявність та накопичення радіоактивних відходів та їх захоронення;
- виділення у водне та повітряне середовище тепла конденсації пару та охолодження газу;
- виділення радіоактивних речовин при аваріях.

Гідросфера є найбільшим депо надходження і захоронення радіонуклідів.

У водойми надходять радіонукліди як з атмосфери, так і з поверхневим рідким та твердим стоком. Особливо важливу роль у надходженні і переході радіонуклідів у прісноводні екосистеми відіграють водоймища-охолоджувачі АЕС, що першими беруть на себе нормальні і аварійні скиди і потім здатні внаслідок водообміну і дренажу передавати частину радіонуклідів в основні русла рік [1].

Аналіз досліджень і публікацій

Аналіз підходів до досліджень процесів перенесення і міграції радіонуклідів в екологічних системах показує, що найчастіше для їх опису використовують камерні математичні моделі.

Моделювання міграції радіонуклідів має в своєму арсеналі цілий ряд розробок [1–9], які створюють математичну основу для моделювання процесів міграції радіонуклідів за

трофічними ланцюгами [1; 2; 5; 6], розрахунку коефіцієнтів переходу радіонуклідів із ґрунтів до рослин [1; 3; 4], комплексного опису міграції в лісових екосистемах [7–9], дослідження сезонного накопичення радіонуклідів у грибах та м'ясі тварин [6–8] тощо.

Цикл досліджень із моделювання розподілу радіонуклідів у трофічних ланцюгах України виконано в лабораторіях В. Б. Георгієвського в Інституті атомної енергетики ім. Курчатова [1].

Метод камерних моделей має мінімально можливу складність і є універсальним.

Різниця між камерними моделями переносу радіонуклідів за екологічними та трофічними ланцюгами полягає у змісті, який вкладається у блоки (камери), значеннях коефіцієнтів переносу та законах їх зміни.

Мета роботи – змодельовати процес міграції радіонуклідів у системі біологічних ставків на прикладі Південноукраїнської АЕС за допомогою методу камерних моделей.

Модель міграції радіонуклідів у біологічних ставках

Для модельного дослідження системи біоставків АЕС використали динамічну камерну модель, припустивши, що радіонукліди, надійшовши в камеру, миттєво перемішуються в усіх частинах камери однаково в будь-який момент часу, а втрати радіонуклідів камерою пропорційні активності радіонуклідів у камері.

За основу була взята типова водна екосистема [1], що складається з трьох камер:

- вода;
- біота;
- донні відклади.

Взаємодія між камерами задається за допомогою коефіцієнтів переходу радіонуклідів з однієї камери в іншу за одиницю часу, наприклад, a_{32} – коефіцієнт переходу радіонуклідів із камери біота в камеру вода біологічного ставка I (доля радіонуклідів в камері біота, яка переходить до камери вода за одиницю часу).

Розрахунки цих коефіцієнтів (табл. 1) базуються на літературних даних про середні швидкості розподілу та перерозподілу радіонуклідів в екосистемах [10].

Перенесення радіонуклідів з однієї камери до іншої відбувається за законами кінетики першого порядку й описується системою простих диференціальних рівнянь. При цьому коефіцієнт переходу радіонукліда між камерами є сталим.

Для опису перенесення радіонуклідів в екосистемах біоставків (без джерела) складено систему диференціальних рівнянь першого порядку зі сталими коефіцієнтами перенесення радіонуклідів між камерами a_{ij} :

$$\frac{dx(t)}{dt} = 1;$$

$$\begin{aligned} \frac{dy(t)}{dt} &= a_{42}k(t) + a_{32}z(t) - a_{24}y(t) - \\ &- a_{23}y(t) - a_{25}y(t) = \\ &= 0,03k(t) + 0,01z(t) - 0,1y(t) - \\ &- 0,1y(t) - 0,5y(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dz(t)}{dt} &= a_{23}y(t) - a_{32}z(t) - a_{34}z(t) = \\ &= 0,1y(t) - 0,01z(t) - 0,01z(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dk(t)}{dt} &= a_{24}y(t) + a_{34}z(t) - a_{42}k(t) = \\ &= 0,1y(t) + 0,01z(t) - 0,03k(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dl(t)}{dt} &= a_{25}y(t) + a_{75}n(t) + a_{65}m(t) - \\ &- a_{57}l(t) - a_{56}l(t) - a_{58}l(t) = \\ &= 0,5y(t) + 0,03n(t) + 0,01m(t) - \\ &- 0,1l(t) - 0,1l(t) - 0,5l(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dm(t)}{dt} &= a_{56}l(t) - a_{65}m(t) - a_{67}m(t) = \\ &= 0,1l(t) - 0,01m(t) - 0,01m(t); \end{aligned}$$

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів переходу радіонуклідів із камери в камеру

Камери		a_{ij}	Значення
Джерело \rightarrow Вода I		a_{12}	–
Біоставок I	Вода \rightarrow Біота	a_{23}	0,1
	Біота \rightarrow Вода	a_{32}	0,01
	Біота \rightarrow Донні відклади	a_{34}	0,01
	Вода \rightarrow Донні відклади	a_{24}	0,1
	Донні відклади \rightarrow Вода	a_{42}	0,03
Вода I \rightarrow Вода II		a_{25}	0,5
Біоставок II	Вода \rightarrow Біота	a_{56}	0,1
	Біота \rightarrow Вода	a_{65}	0,01
	Біота \rightarrow Донні відклади	a_{67}	0,01
	Вода \rightarrow Донні відклади	a_{57}	0,1
	Донні відклади \rightarrow Вода	a_{75}	0,03
Вода II \rightarrow Вода III		a_{58}	0,5
Біоставок III	Вода \rightarrow Біота	a_{89}	0,1
	Біота \rightarrow Вода	a_{98}	0,01
	Біота \rightarrow Донні відклади	$a_{9\ 10}$	0,01
	Вода \rightarrow Донні відклади	$a_{8\ 10}$	0,1
	Донні відклади \rightarrow Вода	$a_{10\ 8}$	0,03
Вода III \rightarrow Водойма-охолоджувач		$a_{8\ 11}$	0,5

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= a_{57}l(t) + a_{67}m(t) - a_{75}n(t) = \\ &= 0,1l(t) + 0,01m(t) - 0,03n(t); \end{aligned}$$

$$\frac{dr(t)}{dt} = a_{8\ 11}o(t) = 0,5o(t),$$

$$\begin{aligned} \frac{do(t)}{dt} &= a_{58}l(t) + a_{98}p(t) + a_{10\ 8}q(t) - \\ &- a_{89}o(t) - a_{8\ 10}o(t) - a_{8\ 11}o(t) = \\ &= 0,5l(t) + 0,01p(t) + 0,03q(t) - \\ &- 0,1o(t) - 0,1o(t) - 0,5o(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dp(t)}{dt} &= a_{89}o(t) - a_{98}p(t) - a_{9\ 10}p(t) = \\ &= 0,1o(t) - 0,01p(t) - 0,01p(t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dq(t)}{dt} &= a_{8\ 10}o(t) + a_{9\ 10}p(t) - a_{10\ 8}q(t) = \\ &= 0,1o(t) + 0,01p(t) - 0,03q(t); \end{aligned}$$

де змінні $x, y, z, k, l, m, n, o, p, q, r$ – динамічні питомі активності радіонуклідів у камерах: джерело, біологічний ставок I (вода, біота, донні відклади), біологічний ставок II (вода, біота, донні відклади), біологічний ставок III (вода, біота, донні відклади), водойма-охолоджувач;

t – час.

Обчислення систем диференціальних рівнянь здійснювалося за допомогою комп'ютерної програми MAPLE 6.

Розв'язок системи у графічному вигляді подано на рис. 1, 2.

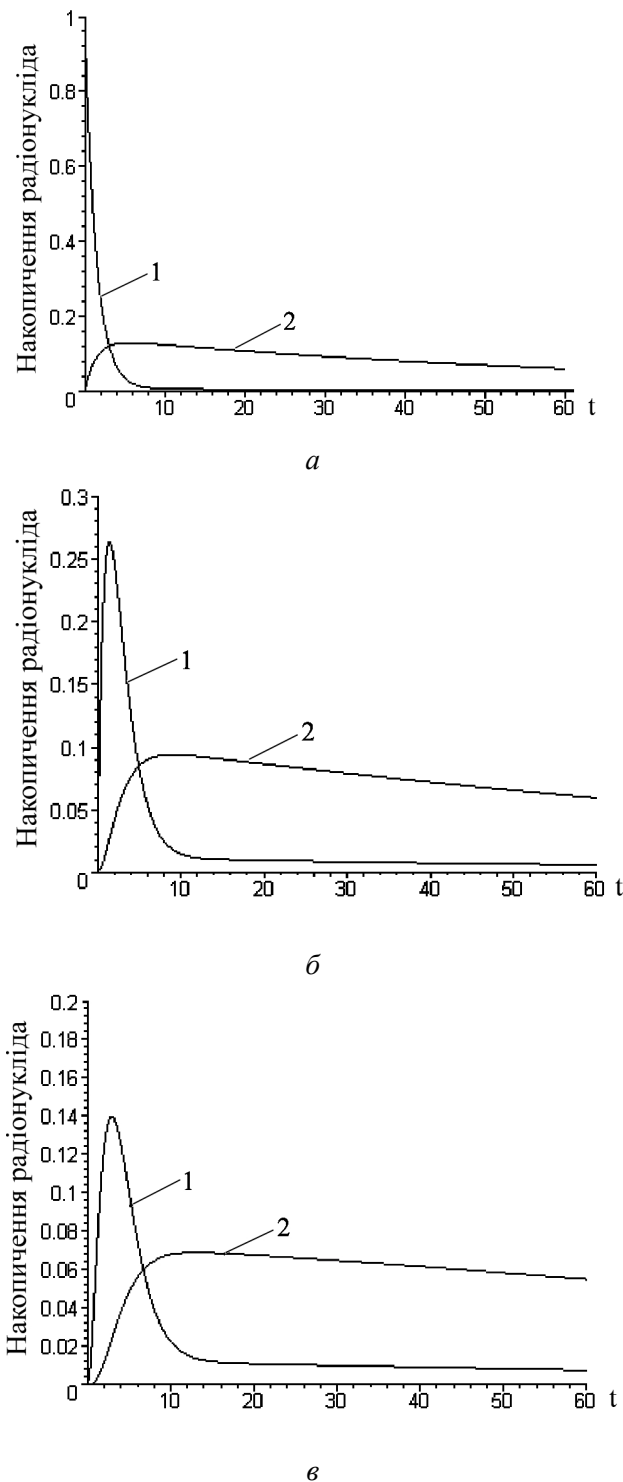


Рис. 1. Накопичення радіонуклідів у біоставках:
 а – біоставок I;
 б – біоставок II;
 в – біоставок III;
 1 – камера і вода;
 2 – камери біота та донні відклади

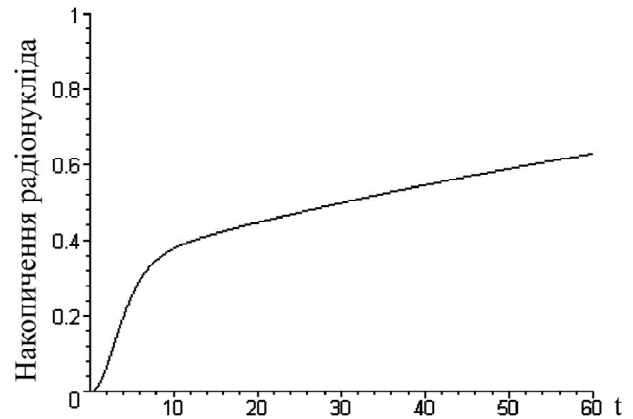


Рис. 2. Накопичення радіонуклідів у камері водойма-охолоджувач

Розподіл радіонуклідів для інших камер цієї моделі наведено в табл. 2 зі значенням максимальної питомої активності радіонуклідів у певний момент часу.

Найбільше накопичення концентрації радіонуклідів спостерігається у камері вода біоставка II (2,63 % на четвертий рік після скиду радіоактивно забруднених вод АЕС) та у камері вода біоставка III (1,4 % на четвертий рік), а найменше у камерах біота та донні відклади біоставка III (0,7 % на десятий рік).

Протягом восьми місяців накопичення радіонуклідів у камері водойма-охолоджувач буде стрімко зростає до 3,5 %, потім процес сповільниться й за п'ять років накопичення радіонуклідів у водоймі-охолоджувачі досягне приблизно 6 %.

Висновки

Вода у водоймищі відіграє роль сполучної ланки в ланцюзі міграції радіонуклідів у донні відклади та біомасу. Висока поглинальна здатність мулу зумовлена великою кількістю органічних речовин, що містяться в ньому і перебувають у високо дисперсійному колоїдному стані.

Завдяки цьому саме донні відклади відіграють у водоймищі роль депо, в якому концентруються радіонукліди.

Таблиця 2

Накопичення радіонуклідів у камерах

Камери		Максимальний вміст радіонуклідів, %	Час (місяці)
Біологічний ставок I	Біота	1,3	6
	Донні відкладення	1,3	6
Біологічний ставок II	Вода	2,63	4
	Біота	0,95	10
	Донні відкладення	0,95	10
Біологічний ставок III	Вода	1,4	4
	Біота	0,7	10
	Донні відкладення	0,7	10
Водойма-охолоджувач		3,5	8

Роль біоти як депо радіонуклідів звичайно незначна (при малому вмісті біоти). Проте завдяки біомасі відбувається очищення води водоймищ від радіонуклідів. Таким чином здійснюється кондиціювальна функція біоти, а також функція транспортування радіонуклідів із води в донні відклади.

При значному вмісті біоти в ставках та великих значеннях коефіцієнтів накопичення відбувається значний внесок біоти в депонування радіонуклідів, який збігається з поглинанням радіонуклідів донними відкладами.

Використання методу камерних моделей дозволило змоделювати параметри радіоекологічної ємності системи біоставків та водойми-охолоджувача АЕС.

Модель дозволяє за обмеженими даними з моніторингу екосистем прогнозувати динаміку забруднення водойм радіонуклідами.

Література

1. Кутлахмедов Ю. О. Основи радіоекології: навч. посіб. / Ю. О. Кутлахмедов, В. І. Корогодін, В. К. Кольтовер / за ред. В. П. Зотова. – К.: Вища шк., 2003. – 319 с.
2. Апплби Л. Дж. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиозкология после Чернобыля / Л. Дж. Апплби., Л. Довели, Ю. К.. Мирша / пер. с англ. под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. – М.: Мир, 1999. – 512 с.
3. Багоцкий С. В. Библиографический указатель отечественных работ. Математические модели в экологии / С. В. Багоцкий, А. Д. Базыкин, Н. П. Монастырская. – М.: ВИНТИ, 1981. – 226 с.

4. Кравець О. П. Екологічний прогноз розвитку радіаційної ситуації в Україні та формування доз людини від внутрішнього опромінення / О. П. Кравець, Д. М. Гродзинський // Гігієна населених міст. – К.: Наук. думка, 2000. – С. 70–87.

5. Сердюцкая Л. Ф. Техногенная экология: Математико-картографическое моделирование / Л. Ф. Сердюцкая, А. В. Яцишин. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 232 с.

6. Франс Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Х. М. Торили / пер. с англ. А. С. Каменского / под ред. Ф. И. Ерешко. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

7. Методи та засоби математичного моделювання міграції радіонуклідів у природних екосистемах. Т.1. Від аналізу до математичної моделі / В.М. Ярчук, М.М. Колоніцький, А. М. Ковальчук та ін. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 142 с.

8. Методи та засоби математичного моделювання міграції радіонуклідів у природних екосистемах. Т. 2. Міждисциплінарний аналіз проблеми / В. М. Ярчук, М. М. Колоніцький, А. М. Ковальчук та ін. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 224 с.

9. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М.З. Згуровский, В.В. Скопецкий, В.К. Хрущ и др. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.

10. Горев Л. П. Радиоактивность природных вод / Л. П. Горев, В. І. Мелешенко, В. К.. Хільчевський. – К.: Вища шк., 2003. – 124 с.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2011.