

УДК 519.876.5:504+504.455(045)

**АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЕКОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ
У КАСКАДІ ГОЛОСІВСЬКИХ СТАВКІВ****М. О. Кравець, Ю. О. Кутлахмедов** – д-р біол. наук, проф.

Національний авіаційний університет

E-mail: maria050690@ukr.net

Побудовано базову модель каскаду Голосіївських ставків. Проведено аналіз процесів розподілу і перерозподілу радіонуклідів по компонентах у каскаді. Розраховано оцінки вмісту радіонуклідів у 1-му та 2-му ставках на 20 та 40 роки після Чорнобильської аварії. Розглянуто вплив швидкостей перенесення радіонуклідів на процеси розподілу і перерозподілу радіонуклідів між першим і другим ставками.

Ключові слова: каскад ставків; камерні моделі; радіонуклід; донні відклади; екологічні процеси.

We construct a basic model golosiivskyi cascade ponds. The analysis of the process of distribution and redistribution radionuclides for components in cascade. Calculated estimates of radionuclide content in the first and second rates of 20 and 40 years after the accident. The influence of the velocity radionuclide transfer and distribution radionuclides between the two rates.

Keywords: cascade lakes; chamber model; radionuclides; sediments; ecological processes.**Вступ**

Однією з неповторних окрас столиці України є Голосіївський ліс, на території якого знаходиться мережа струмків та ставків. Водойми Голосіївського лісу, утворені внаслідок загачування річкових або струмкових долин, можна віднести до трьох основних груп. Це, перш за все, Горіховатські ставки (на р. Горіховатка), Дідорівські ставки (на Дідорівському струмку) та Китаївські ставки (на Китаївському струмку) [2].

Кожний із трьох каскадів, утворений чотирма, сполученими між собою ставками. У нижній частині кожний ставок обмежений греблею, біля якої розмішений колодязь, по якому при відповідному рівні вода потрапляє в розташований нижче ставок. Зазначені водойми належать до типу дренажних або декоративно-рекреаційних [3].

Загальна площа Дідорівських, Горіховатських і Китаївських ставків 10,3, 5,0 і 4,3 га відповідно. Глибина ставків у центральній частині коливається від 50–100 до 250–300 см, а їхнє живлення здійснюється переважно за рахунок атмосферної і джерельної води. Переважаючий ґрунт — замулений пісок, детрит.

Зазначені водойми відносяться до типу дренажних або декоративно-рекреаційних. Усі вони зазнають посиленого евтрофування (збагачення води біогенами) [3].

Як і більшість водойм України, вони були помітно забруднені радіонуклідами після Чорнобильської аварії 1986 р.

Постановка проблеми

Київ — найбільше місто України, котре як і його околиці, перевантажене сотнями промислових підприємств різних напрямів. Їх діяльність, як правило, супроводжується викидами у навко-

лишнє середовище певних відходів, які негативно впливають на біоту. У першу чергу, це важкі метали, пестициди, нітрати, діоксини. Постраждав Київ і внаслідок забруднення радіонуклідами після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р.

Голосіївський ліс налічує понад тисячу гектарів — парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення. Він розташований серед житлових масивів у південній правобережній частині Києва, він є одним з найпопулярніших місць відвідування та відпочинку киян та гостей міста.

Голосіївський ліс зазнав і зазнає найрізноманітніших забруднень. Як і будь-який ліс, — своєрідний бар'єр на шляху поширення забруднень, виконує роль захисника довкілля, є акумулятором різних речовин, у тому числі й токсичних. Невід'ємною частиною Голосіївського парку є його водойми [1].

Голосіївські ставки зазнають посиленого евтрофування, у зв'язку зі скидами забруднювальних речовин. Отже, на сьогодні існує нагальна необхідність вивчення екологічних процесів, що протікають у ставках. Для цього пропонуємо використання радіонуклідів як трасери, оскільки концентрації радіонуклідів, таких як ^{137}Cs , досить легко визначаються у водоймах. Відомо, що ^{137}Cs є хімічним аналогом важливого для біоти макроелемента калія (К). Моделювання міграції та розподілу ^{137}Cs може бути з успіхом використано для вивчення розповсюдження таких поллютантів, як Pb, Zn та інших важких металів по каскадах ставків. Усі три каскади повністю знаходяться в межах однієї паркової зони, що дозволяє побудувати досить точні моделі.

Об'єкт дослідження — моделі каскадів Голосіївських ставків.

Предмет дослідження — екологічні процеси в каскадах Голосіївських ставків.

Аналіз досліджень і публікацій

Радіоактивне забруднення водних екосистем може відбуватися у формі великого різноманіття форм і складу речовин, що містять радіонукліди. Під час надходження радіоактивних речовин у вигляді аерозолів на водну поверхню і з території водозбору, шляхом поверхневого стоку, відбувається їхнє розсіювання у водній товщі та подальший розподіл по компонентах водних екосистем зі встановленням певної динамічної рівноваги, що визначається динамікою процесів сорбції і десорбції між рідкою (вода) і твердою (донні відклади, зависла речовина) фазами, а також накопиченням радіонуклідів живими організмами.

Слід зазначити, що при короткочасному надходженні у водойми радіонукліди достатньо швидко поглинаються донними відкладами та водними організмами, внаслідок чого їх питома активність у воді швидко знижується. Концентрація ж багатьох радіонуклідів у водяних рослинах, тваринах і донних відкладах може тривалий час зберігатися на високому рівні, що перевищує їхню концентрацію у воді на порядки величин [4; 5].

Накопичення радіонуклідів біотою обумовлене особливостями мінерального обміну всіх живих організмів, при якому надходження мікроелементів та макроелементів в організм відбувається значно швидше, ніж їх виведення. Донні відклади осаджують на собі основну частину радіонуклідів, що потрапляють у водоймище, завдяки великій сорбційній масі та місткості поглинання.

Подальші процеси вертикальної та горизонтальної міграції і перерозподілу радіонуклідів у водних екосистемах пов'язані з біогеохімічною циклічністю переміщення речовин у природі і протікають значно повільніше. При цьому разом з переважаючими седиментаційними і сорбційними процесами депонування радіонуклідів у донних відкладах і осадженням на зависях, важливе значення має їхня міграція і накопичення в трофічній мережі, а також подальша участь в біотичному кругообігу в результаті життєдіяльності водних організмів.

Важливу роль у «долі» радіонуклідів у прісних водоймах відіграють донні відклади. Маючи велику сорбційну масу і місткість поглинання, вони осаджують на собі основну частину випромінювачів, що потрапляють у водойму, і тим самим частково (часто тимчасово) виводять їх з біотичного кругообігу.

У зв'язку з цим велика роль донних відкладів у процесах самоочищення води від різних, зокрема радіоактивних речовин. Це відбувається в результаті сорбції радіонуклідів поверхнею дна, дифузії з водою в товщу донних відкладів, за рахунок осадження на дно завислих частинок, що несуть сорбовані радіонукліди, а також у результаті осідання на дно залишків відмерлих гідробіонтів (детритурослинного і тваринного походження), що також містять у своїх тканинах радіонукліди.

Найбільша сорбційна здатність і поглинальна місткість притаманна донним відкладам, що складаються переважно з дрібнодисперсних глинистих або мулистих частинок. Тому в місцях, де на дні є потужні відклади мулу, можна чекати найбільшого накопичення радіоактивних речовин, ніж у гирлі річок, дно яких сформоване з чистих, добре промитих пісків, галечників або скельних порід [7].

Для опису перенесення (переходу) і міграції радіонуклідів в екосистемах використовують метод камерних моделей. У них весь ланцюг перенесення радіонуклідів поділяють на камери [6]. Взаємодія між камерами задається за допомогою коефіцієнтів переходу радіонуклідів з однієї камери в іншу за одиницю часу (частіше за рік). Коефіцієнти вибираються за натурними дослідженнями та розрахунками [4].

Цілі

Мета роботи — побудувати модель каскаду Голосіївських ставків та провести її аналіз.

У зв'язку з необхідністю вирішення проблеми значної евтрофікації Голосіївських ставків у цій роботі було поставлено низку завдань:

- побудувати блок-схему каскаду із чотирьох ставків;
- розробити базову модель каскадів Голосіївських ставків;
- визначити коефіцієнти (швидкості) переходів радіонукліду трасеру ^{137}Cs між камерами розробленої моделі;
- побудувати графіки залежності зміни швидкості переходу радіонуклідів із першого ставка в другий на 20 та 40 роки після аварії при різних діапазонах швидкостей переходу між камерами;
- проаналізувати залежність зміни швидкості надходження трасеру з першої водойми у другу на 20 та 40 роки після аварії при різних діапазонах швидкостей переходу.

Розробка блок-схеми каскаду ставків «Голосіївський»

Кожний з трьох каскадів Голосіївського парку складається з чотирьох ставків. Кожний ставок являє собою камеру з переходом радіонуклідів

між трьома складовими — водою (а), біотою (b) і донними відкладами (с). Джерелом (а0) виступає поверхнево-схиловий стік і підземні води. Виток (а5) для Горіховатських ставків виступає Либідь, а Дідорівські і Китаївські впадають в Галерну затоку Дніпра (рис. 1).



Рис. 1. Блок-схема каскаду ставків:
а — вода; b — біота; с — донні відклади

В кожному ставку спостерігається перехід радіонуклідів із води в біоту і навпаки, із води у донні відклади і навпаки, із біоти в донні відклади. По каскаду радіонукліди передаються з водою, що повільно перетікає між ставками.

Побудова та аналіз камерної моделі Голосіївських ставків

Базова модель Голосіївських ставків (Дідорівський каскад) побудована на основі блок-схеми і враховує швидкості переходу радіонуклідів між камерами та всередині кожної камери між водою, біотою і донними відкладами. Камерна модель каскаду ставків у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку наведена нижче:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} a_0(t) &= -a_{01} * a_0, \frac{d}{dt} a_1(t) = a_{01} * a_0 + a_{21} * b_1 + a_{31} * c_1 - (a_{14} + a_{13} + a_{12}) * a_1, \\ \frac{d}{dt} b_1(t) &= a_{12} * a_1 - (a_{23} + a_{21}) b_1, \frac{d}{dt} c_1(t) = a_{13} * a_1 + a_{23} * b_1 - a_{31} * c_1, \\ \frac{d}{dt} a_2(t) &= a_{14} * a_1 + a_{54} * b_2 + a_{64} * c_2 - (a_{46} + a_{45} + a_{47}) * a_2, \frac{d}{dt} b_2(t) = a_{45} * a_2 - (a_{54} + a_{56}) * b_2, \\ \frac{d}{dt} c_2(t) &= a_{46} * a_2 + a_{56} * b_2 - a_{64} * c_2, \frac{d}{dt} a_3(t) = a_{47} * a_2 + a_{87} * b_3 + a_{97} * c_3 - (a_{710} + a_{78} + a_{79}) * a_3, \\ \frac{d}{dt} b_3(t) &= a_{78} * a_3 - (a_{87} + a_{89}) * b_3, \frac{d}{dt} c_3(t) = a_{79} * a_3 + a_{89} * b_3 - a_{97} * c_3, \\ \frac{d}{dt} a_4(t) &= a_{710} * a_3 + a_{1110} * b_4 + a_{1210} * c_4 - (a_{1013} + a_{1011} + a_{1012}) * a_4, \\ \frac{d}{dt} b_4(t) &= a_{1011} * a_4 - (a_{1110} + a_{1112}) * b_4, \frac{d}{dt} c_4(t) = a_{1012} * a_4 + a_{1112} * b_4 - a_{1210} * c_4, \\ \frac{d}{dt} a_5(t) &= -a_{1013} * a_4. \end{aligned}$$

Середні значення швидкостей перенесення взяті за натурними дослідженнями та за результатами розрахунків.

У даній роботі враховані лише середні значення. Максимальні і мінімальні будуть досліджуватися нами надалі.

Як оціні середні значення швидкостей переходу трасерів вибрані такі величини:

$$\begin{aligned} a_{01} &= 0,05; a_{21} = 0,03; a_{12} = 0,05; \\ a_{13} &= 0,6; a_{31} = 0,04; a_{14} = 0,05; \\ a_{23} &= 0,02; a_{54} = 0,03; a_{45} = 0,05; \\ a_{46} &= 0,6; a_{64} = 0,04; a_{47} = 0,05; \\ a_{56} &= 0,02; a_{87} = 0,03; a_{78} = 0,05; \\ a_{79} &= 0,6; a_{97} = 0,04; a_{710} = 0,05; \\ a_{89} &= 0,02; a_{1110} = 0,03; a_{1011} = 0,05; \\ a_{1012} &= 0,06; a_{1210} = 0,04; a_{1013} = 0,05; \\ a_{1112} &= 0,02. \end{aligned}$$

За цими даними на розробленій камерній моделі каскаду Голосіївських ставків отримано такі результати, а саме графіки для найбільш важливих у процесах розподілу та перерозподілу радіонуклідів, наведені на рис. 1 та 2.

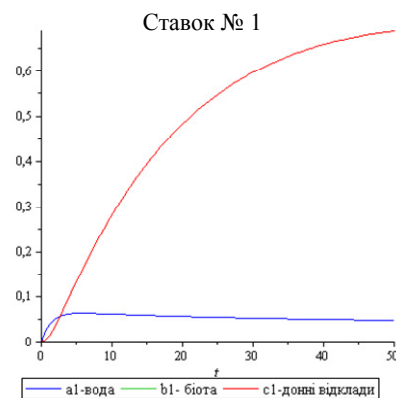


Рис. 2. Динаміка зміни концентрації радіонуклідів протягом 50 років у першому ставку.

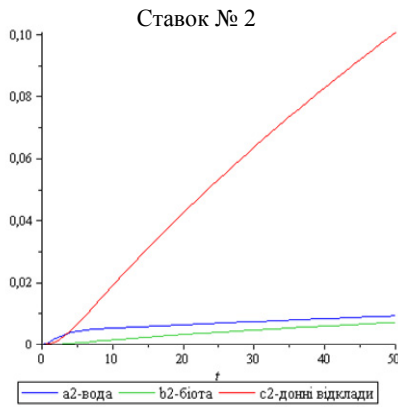


Рис. 3. Зміна концентрації радіонуклідів протягом 50 років у другому ставку

Із графіків видно, що найголовнішу роль у накопиченні радіонуклідів відіграють донні відклади 1-го та 2-го ставків.

За моделлю встановлено, що з роками концентрації радіонуклідів зростають. Також видно, що концентрації радіонуклідів, проходячи по каскаду, зменшуються, що свідчить про очищувальну здатність каскаду ставків.

Залежність зміни величини швидкості переходу із першого ставка в другий на 20 та 40 роки після аварії при різних діапазонах швидкостей переходу між камерами

Нами були розраховані оцінки вмісту радіонуклідів у 1-му та 2-му ставках на 20 та 40 роки після аварії. Ці роки аналізу та спостереження найбільш виразні у динаміці розподілу та перерозподілу радіонуклідів по компонентах ставків. Початковий рівень запасу радіонуклідів у джерелі надходження (територія водозбору ставків) прийнято за одиницю (табл. 1).

Таблиця 1

Середні швидкості перенесення радіонуклідів по каскаду ставків на 20 і 40 рік при середніх швидкостях переходу між камерами

Рік	Елемент камери	Ставок № 1	Ставок № 2	Ставок № 3	Ставок № 4
40	а-вода	0,050	0,0084	0,0011	0,00013
40	б-біота	0,046	0,006	0,00068	0,00007
40	с-донні відклади	0,66	0,083	0,0092	0,00093
20	а-вода	0,056	0,0064	0,00064	0,00006
20	б-біота	0,037	0,0033	0,00027	0,00002
20	с-донні відклади	0,48	0,043	0,0035	0,00027

Далі побудували графіки зміни швидкостей перенесення радіонуклідів трасерів між ствками каскаду (рис. 4).

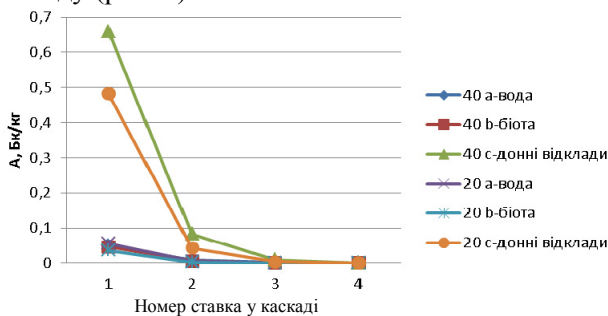


Рис. 4. Динаміка зміни швидкості переходу радіонуклідів трасерів між камерами на 20 та 40 роки після аварії

Видно, що головну роль у накопиченні відіграють донні відклади. З наведеного графіка рис. 4 концентрації на 40 рік спостерігаються більші, ніж на 20, у той час 3-й і 4-й ставки практично очищені вже на 20 рік.

Для аналізу цих даних побудовані дані по зміні швидкості переходу трасера на 20 і 40 рік після аварії. Оскільки найбільшу роль у депонуванні Cs^{137} відіграють перший і другий ставки,

проаналізуємо їхні дані. Слід зазначити, що малий вміст біоти у ставках, при реальному варіанті, показує малу роль цієї біоти в депонуванні трасерів по ставках.

Розглянемо вплив величин швидкостей перенесення радіонуклідів на дані процеси (табл. 2).

Таблиця 2

Залежність зміни швидкості надходження трасера з першої водойми в другу на 20 рік після аварії при різних діапазонах швидкостей переходу між камерами

	Мінімальний	Середній	Максимальний
Вода	0,037	0,053	0,036
Донні	0,23	0,44	0,52

На графіку рис. 5 спостерігається помітне збільшення зміни швидкості кривої надходження трасера при збільшенні швидкостей переходу.

Розглянемо аналогічні дані розрахунків на 40 рік після аварії (табл. 3).

Слід відзначити відносно малі зміни показника, що відображає настання стабілізації та рівноваги в процесах перенесення та розподілу радіонуклідів по компонентах екосистеми каскаду Голосіївських ставків.

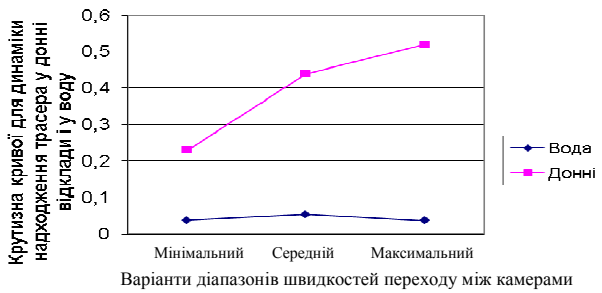


Рис. 5. Залежність зміни швидкості надходження трасера із першої водойми в другу на 20 рік після аварії при різних діапазонах швидкостей переходу між камерами

Таблиця 3

Залежність крутизни надходження трасера із першої водойми в другу на 40 рік після аварії при різних діапазонах швидкостей переходу між камерами

	Мінімальний	Середній	Максимальний
Вода	0,036	0,042	0,036
Донні	0,39	0,58	0,54

Побудуємо графік цієї залежності (рис. 6).

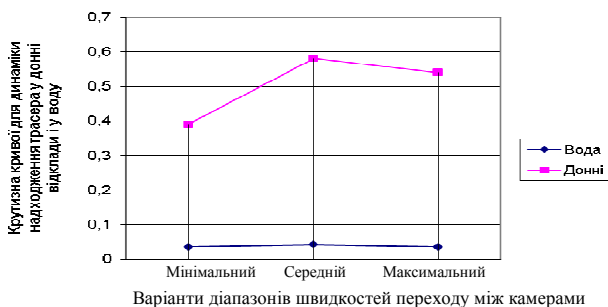


Рис. 6. Залежність зміни швидкості надходження трасера із першої водойми в другу на 40 рік після аварії при різних діапазонах швидкостей переходу між камерами

Висновки

У результаті роботи вдалося адекватно описати поведінку екосистеми каскаду Голосіївських ставків. У моделях показано, що головну роль в утилізації поллютантів відіграє перший ставок. Тобто очищення по каскаду від радіонуклідів відбувається аналогічно каскаду Дніпровських водосховищ, роль яких в очищенні від радіонуклідів підтверджена дослідженнями [7].

Отже, об'єкт дослідження дає змогу проводити адекватне та системне моделювання екологічних процесів, мати засоби оцінки та прогнозу екологічних процесів, що відбуваються в каскадних системах Голосіївських ставків, а потім і мати можливість переносити ці дані на інші системи водойм-каскадів.

Згідно з моделлю, згодом помітно відбувається прискорення перерозподілу радіонуклідів із першого у другий ставок. Ця закономірність зберігається при різних швидкостях обміну між камерами.

Звертає на себе увагу відносно мала роль біоти у депонуванні і перерозподілі трасера. Річ у тім, що концентрація біоти та швидкості переходу малі. Є підстави вважати, що зі збільшенням концентрації біоти і швидкостей переходу в біоту трасера її роль збільшиться.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гудков І. М. Екологія Голосіївського лісу. Монографія / І. М. Гудков. — К. : Фенікс, 2007. — 336 с.
2. Екологічний стан київських водойм / [О. А. Афанасьєва, Т. С. Багацька, Л. Г. Оляницька, І. В. Небогаткін, Л. А. Хрокало та ін.]. — К. : Фітосоціоцентр, 2010. — 256 с.
3. Іванова І. Ю. Высшая водная растительность водоёмов г. Киева / И. Ю. Иванова, Г. В. Харченко, П. Д. Клоченко // Гидробиологический журнал. — К., 2007. — Т. 43, № 1. — С. 38–58.
4. Кутлахмедов Ю. О. Радиоекологія / Ю. О. Кутлахмедов, І. В. Матвєєва, В. П. Петрусенко, В. В. Родіна. — К. : ДЕА, 2011. — 192 с.
5. Кутлахмедов Ю. О. Радиоекологія. Камерні моделі : навч. посіб. / Ю. О. Кутлахмедов, І. В. Матвєєва, В. П. Петрусенко, В. В. Родіна. — К. : НАУ, 2013. — 84 с.
6. Гродзинський Д. М. Радиобіологічні ефекти хронічного опромінення рослин у зоні впливу Чорнобильської катастрофи : наук. вид. / Д. М. Гродзинський, М. І. Гуца, О. П. Дмитрієв, Ю. О. Кутлахмедов [та ін.]. — К. : Наук. думка, 2008. — 373 с.
7. Гудков І. М. Радиоекологія: навч. посібник / І. М. Гудков, В. А. Гайченко, В. О. Кашпаров, Ю. О. Кутлахмедов, Д. І. Гудков, М. М. Лазарєв. — К. : 2010. — 417 с.

Стаття надійшла до редакції 13.06.2014.