

М. О. Кравець, А. О. Побийпеч, Ю. О. Кутлахмедов

*Національний авіаційний університет, Київ***МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ РАДІОНУКЛІДА  $^{137}\text{Cs}$   
В КАСКАДІ ДІДОРІВСЬКИХ СТАВКІВ**

Побудована базова модель перенесення радіонукліда  $^{137}\text{Cs}$  по каскаду Дідорівських ставків. Проведено моніторингові дослідження каскаду. На основі натурних даних уточнено динаміку утримання в різних камерах та компонентах системи базової моделі й отримано більш точну модель перенесення  $^{137}\text{Cs}$ .

*Ключові слова:* камерні моделі, ізотоп  $^{137}\text{Cs}$ , компоненти біоти, депонування радіонуклідів, донні відкладення, каскад ставків.

**Вступ**

Науково-технічний прогрес нерозривно пов'язаний із використанням енергетичних ресурсів, і загроза виснаження органічних джерел енергії стимулює інтенсивний розвиток атомної енергетики. Незважаючи на непоодинокі аварії на її об'єктах, у багатьох країнах світу атомні електростанції розглядаються в якості основних джерел енергії [1]. Наявність запасів органічного палива в країні не є лімітуючим фактором розвитку ядерної енергетики, наприклад в Росії; незважаючи на великі запаси органічних енергоносіїв, прийнята програма інтенсивного розвитку цієї галузі. Використання атомної енергії у випадку виникнення аварійних ситуацій призводить до радіоактивного забруднення навколишнього середовища, а водойми служать основним резервуаром, де накопичуються радіоактивні речовини [2 - 4]. При цьому водні екосистеми, з одного боку, є магістралями, по яких відбувається міграція радіонуклідів, з іншого – місцем депонування цих забруднювачів [5, 6].

Потрапляючи у водний об'єкт, радіонукліди вступають у взаємодію з водним середовищем і можуть перебувати в іоннодисперсному, молекулярному і колоїдному станах, а також сорбуватися на зважених частках і частинках донних відкладень. Форма існування радіонукліда у водному масиві залежить як від його хімічних властивостей, так і від хімічного складу і властивостей води. Хімічний склад води формується під впливом геохімічних особливостей району, характеру підстилаючих порід і ґрунтового ландшафту, хімічного складу джерельних вод, біологічних процесів і господарської діяльності людини [7].

Радіонукліди, що надійшли у водні екосистеми, сорбуються зависями й осідають, зазнають радіоактивного розпаду, накопичуються водною біотою тощо, що в підсумку призводить до самоочищення водойми. Унаслідок цих процесів донні відкладення, в яких накопичується найбільша кількість радіонуклідів, стають довгостроковим

депо забруднювачів і джерелом вторинного радіоактивного забруднення. Повітряна і гідрологічна міграція, їхнє надходження в підземні води призводять до їхнього поширення в навколишньому середовищі та включення в харчові ланцюги [8].

На поширення радіонуклідів у водоймах впливає також хімічне забруднення останніх. Під час надходження стічних вод із низькими значеннями рН, що містять радіонукліди, у водойму, вода якої зазвичай має нейтральну або слаболужну реакцію, можна чекати, що частина стабільних хімічних речовин із розчину перейде до твердої фази й осяде на дно. Разом з ними осідатимуть і радіонукліди – хімічні аналоги [9].

Враховуючи різноманіття факторів навколишнього середовища, що впливають на накопичення радіонуклідів компонентами водойм, найбільш перспективним шляхом прогнозування радіоекологічної ситуації у водних екосистемах є математичне моделювання.

**Матеріали та методи**

У роботі використовували метод камерних моделей, який у радіоекології, зокрема в теорії радіємності, багато років успішно використовують для описування перенесення й міграції радіонуклідів в екосистемах. Установлено, що зниження показника радіємності в екосистемі відображає зниження благополуччя та надійності її біоти [10].

Згідно з методом камерних моделей увесь ланцюг перенесення радіонуклідів поділяють на камери. Взаємодія між камерами описується за допомогою коефіцієнтів переходу радіонуклідів із однієї камери в іншу. Коефіцієнти визначають унаслідок розв'язування наближеними методами системи лінійних диференціальних рівнянь, використовуючи в якості реперних точок результати натурних досліджень [11].

Для даного дослідження (2014 - 2015 рр.) відбиралися проби донних відкладень, водних рос-

лин, зокрема рогозу широколистоного, очерету звичайного, ряски малої, рдесту гребінчатого, і сірого лісового ґрунту Дідорівського каскаду водойм. Відібрані проби висушували й вимірювали в них вміст <sup>137</sup>Cs за допомогою гамма-спектрометра СЕГ-01.

Розрахунки проводили з використанням програмного пакета MAPLE 13, розв'язуючи системи

лінійних диференціальних рівнянь за методом Рунге - Кутти. Аналізували поведінку <sup>137</sup>Cs, оскільки він є одним з основних дозоутворюючих ізотопів у радіаційно-забруднених водоймах і їхніх біотичних компонентах. Камерна модель складалась із таких камер, як «ґрунт», «вода», «донні відкладення», «компоненти біоти» (рис. 1).

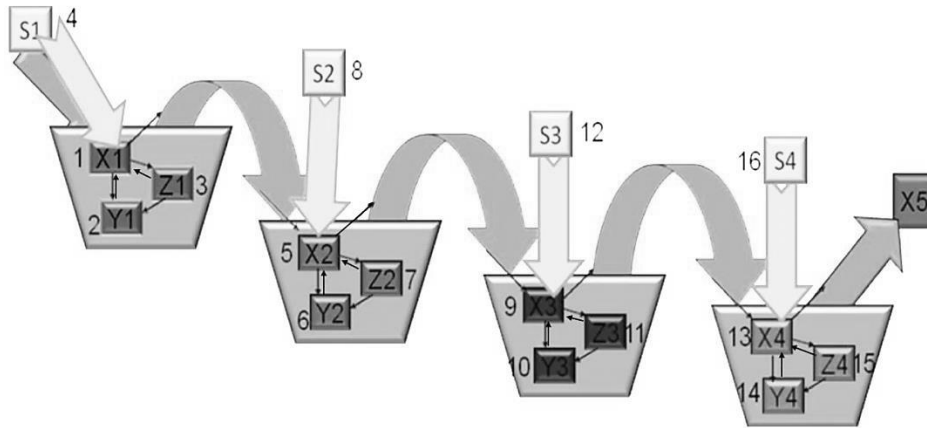


Рис. 1. Блок-схема каскаду Дідорівських ставків:  
X – вода, Y – донні відкладення, Z – компоненти біоти, S – ґрунт.

**Результати досліджень**

Модель Дідорівських ставків враховує швидкості переходу радіонуклідів між камерами та

всередині кожної камери між водою, біотою і донними відкладеннями й описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}
 dX1/dt &= a41 \cdot S1(t) + a31 \cdot Z1(t) + a21 \cdot Y1(t) - (a13 + a12 + a15 + \lambda) \cdot X1(t), \\
 dY1/dt &= a12 \cdot X1(t) + a32 \cdot Z1(t) - (a21 + \lambda) \cdot Y1(t), \\
 dZ1/dt &= a13 \cdot X1(t) - (a32 + a31 + \lambda) \cdot Z1(t), \\
 dS1/dt &= -(a41 + \lambda) \cdot S1(t), \\
 dX2/dt &= a85 \cdot S2(t) + a75 \cdot Z2(t) + a65 \cdot Y2(t) + a15 \cdot X1(t) - (a57 + a56 + a59 + \lambda) \cdot X2(t), \\
 dY2/dt &= a56 \cdot X2(t) + a76 \cdot Z2(t) - (a75 + \lambda) \cdot Y2(t), \\
 dZ2/dt &= a57 \cdot X2(t) - (a76 + a75 + \lambda) \cdot Z2(t), \\
 dS2/dt &= -(a85 + \lambda) \cdot S2(t), \\
 dX3/dt &= a129 \cdot S3(t) + a119 \cdot Z3(t) + a1110 \cdot Y3(t) + a59 \cdot X2(t) - (a911 + a910 + a913 + \lambda) \cdot X3(t), \\
 dY3/dt &= a910 \cdot X3(t) + a1110 \cdot Z3(t) - (a109 + \lambda) \cdot Y3(t), \\
 dZ3/dt &= a911 \cdot X3(t) - (a1110 + a119 + \lambda) \cdot Z3(t), \\
 dS3/dt &= -(a129 + \lambda) \cdot S3(t), \\
 dX4/dt &= a1613 \cdot S4(t) + a1513 \cdot Z4(t) + a1514 \cdot Y4(t) + a913 \cdot X3(t) - (a1315 + a1314 + a1317 + \lambda) \cdot X4(t), \\
 dY4/dt &= a1314 \cdot X4(t) + a1514 \cdot Z3(t) - (a1413 + \lambda) \cdot Y3(t), \\
 dZ4/dt &= a1315 \cdot X3(t) - (a1514 + a1513 + \lambda) \cdot Z3(t), \\
 dS4/dt &= -(a1613 + \lambda) \cdot S4(t),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де *a* – коефіцієнти переходу радіонуклідів між камерами: X1-4 – вода, Y1-4 – донні відкладення, Z1-4 – компоненти біоти, S1-4 – ґрунт, λ – стала напіврозпаду (для <sup>137</sup>Cs = 0,023).

На першому етапі проводили розрахунки за базовою моделлю (див. рис. 1), в якій коефіцієнти переходу між камерами приймали як середні значення, отримані в численних натурних дослідженнях, що проводились нами раніше (табл. 1) [2, 10, 12].

Таблиця 1. Коефіцієнти переходу  $^{137}\text{Cs}$  із камери в камеру для каскаду із чотирьох ставків

Ставок № 1		Ставок № 2		Ставок № 3		Ставок № 4	
$a_{41}$	0,05	$a_{85}$	0,03	$a_{129}$	0,03	$a_{1613}$	0,02
$a_{12}$	0,6	$a_{56}$	0,6	$a_{910}$	0,6	$a_{1314}$	0,6
$a_{21}$	0,04	$a_{65}$	0,04	$a_{109}$	0,04	$a_{1413}$	0,04
$a_{13}$	0,35	$a_{57}$	0,35	$a_{911}$	0,35	$a_{1315}$	0,35
$a_{31}$	0,03	$a_{75}$	0,03	$a_{119}$	0,03	$a_{1513}$	0,03
$a_{15}$	0,05	$a_{59}$	0,05	$a_{913}$	0,05	$a_{1317}$	0,05
$a_{32}$	0,02	$a_{76}$	0,02	$a_{1110}$	0,02	$a_{1514}$	0,02

Динаміку вмісту  $^{137}\text{Cs}$  в камерах за базовою моделлю наведено на рис. 2.

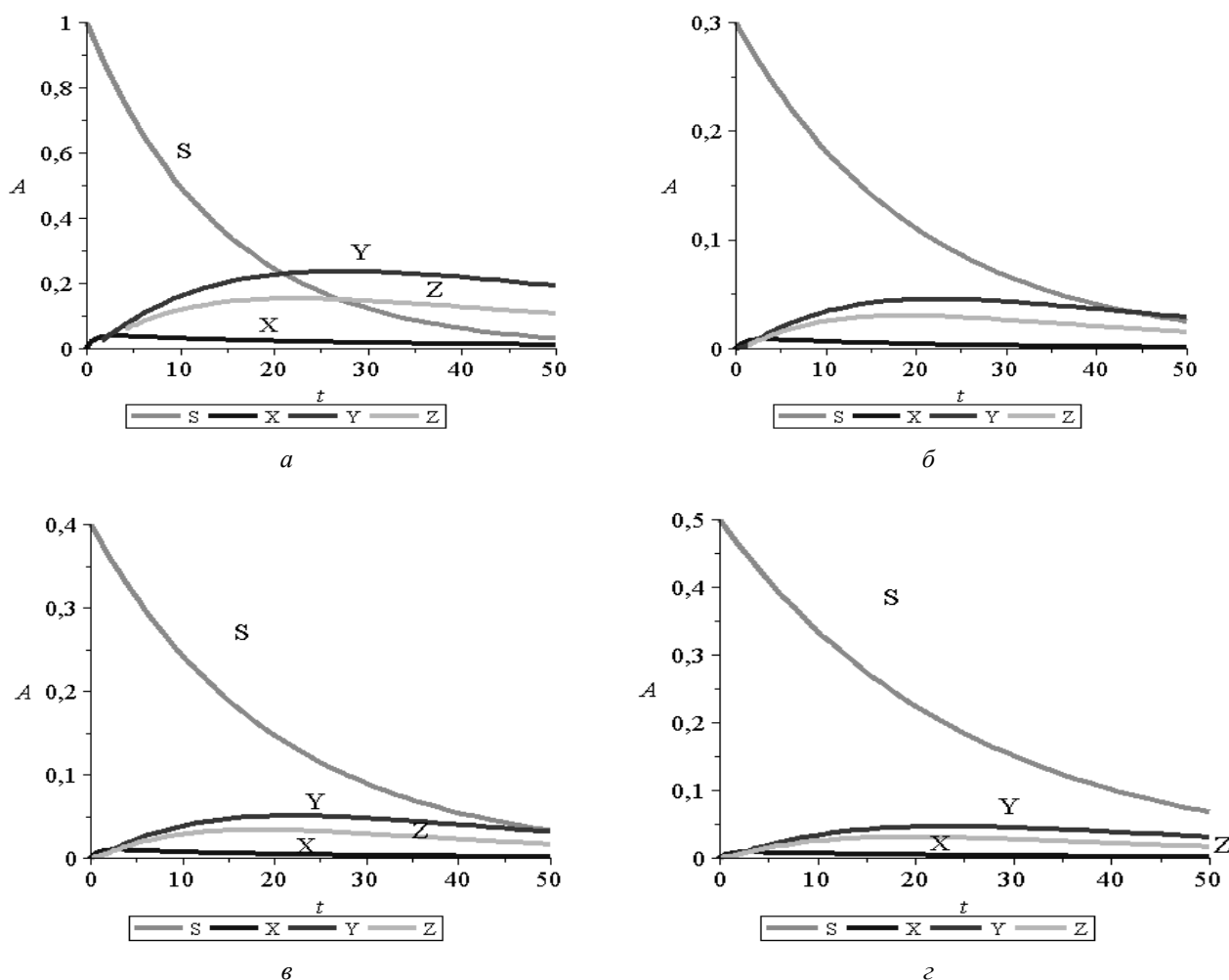


Рис. 2. Базові моделі динаміки накопичення радіонукліда  $^{137}\text{Cs}$  протягом 50 років у компонентах водної екосистеми: *а* – ставок № 1; *б* – ставок № 2; *в* – ставок № 3; *г* – ставок № 4. X – вода, Y – донні відкладення, Z – компоненти біоти, S – ґрунт. По осі абсцис *t* – термін після аварії, роки; по осі ординат *A* – відносна активність  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах екосистеми (за 1 прийнята активність цезію в ґрунті водозбору ставка № 1).

Найбільше накопичення радіонуклідів спостерігали в компонентах ставка № 1 (оз. Дідорівка) і поступове очищення від радіонуклідів вниз по каскаду. З часом відбувалось накопичення  $^{137}\text{Cs}$  у донних відкладеннях і біоті.

На другому етапі (2014 - 2015 рр.) проводили натурні дослідження в каскаді Дідорівських ставків і вимірювали фактичну активність  $^{137}\text{Cs}$  в досліджуваних компонентах (табл. 2).

Таблиця 2. Активність <sup>137</sup>Cs (Бк) у компонентах екосистеми Дідорівського каскаду ставків

№ ставка	Рік	А (Бк)		
		Грунт	Донні відкладення	Компоненти біоти
1	2014	166	56,35	62,35
	2015	62	35,5	24,15
2	2014	51,325	43,125	37,6
	2015	55,5	30,5	29,25
3	2014	73,275	38,6	37,875
	2015	47,1	32,2	20,5
4	2014	61,225	30,425	26,475
	2015	48,5	22,5	14,3

Після цього розв'язували систему диференційних рівнянь (1) з урахуванням даних натурних вимірювань, усереднену за 2 роки (див. табл. 2).

Отримали значення коефіцієнтів переходів конкретно для Дідорівських ставків на 29-й і 30-й роки після аварії (табл. 3).

Таблиця 3. Коефіцієнти переходу <sup>137</sup>Cs між камерами для каскаду Дідорівських ставків

Ставок № 1		Ставок № 2		Ставок № 3		Ставок № 4	
a41	0,022	a85	0,045	a129	0,035	a1613	0,022
a12	0,6	a56	0,6	a910	0,6	a1314	0,6
a21	0,1	a65	0,05	a109	0,01	a1413	0,02
a13	0,7	a57	0,5	a911	0,58	a1315	0,68
a31	0,02	a75	0,01	a119	0,01	a1513	0,02
a15	0,05	a59	0,05	a913	0,05	a1317	0,15
a32	0,047	a76	0,02	a1110	0,006	a1514	0,01

Результати прогностичних розрахунків згідно з моделлю наведено на рис. 3.

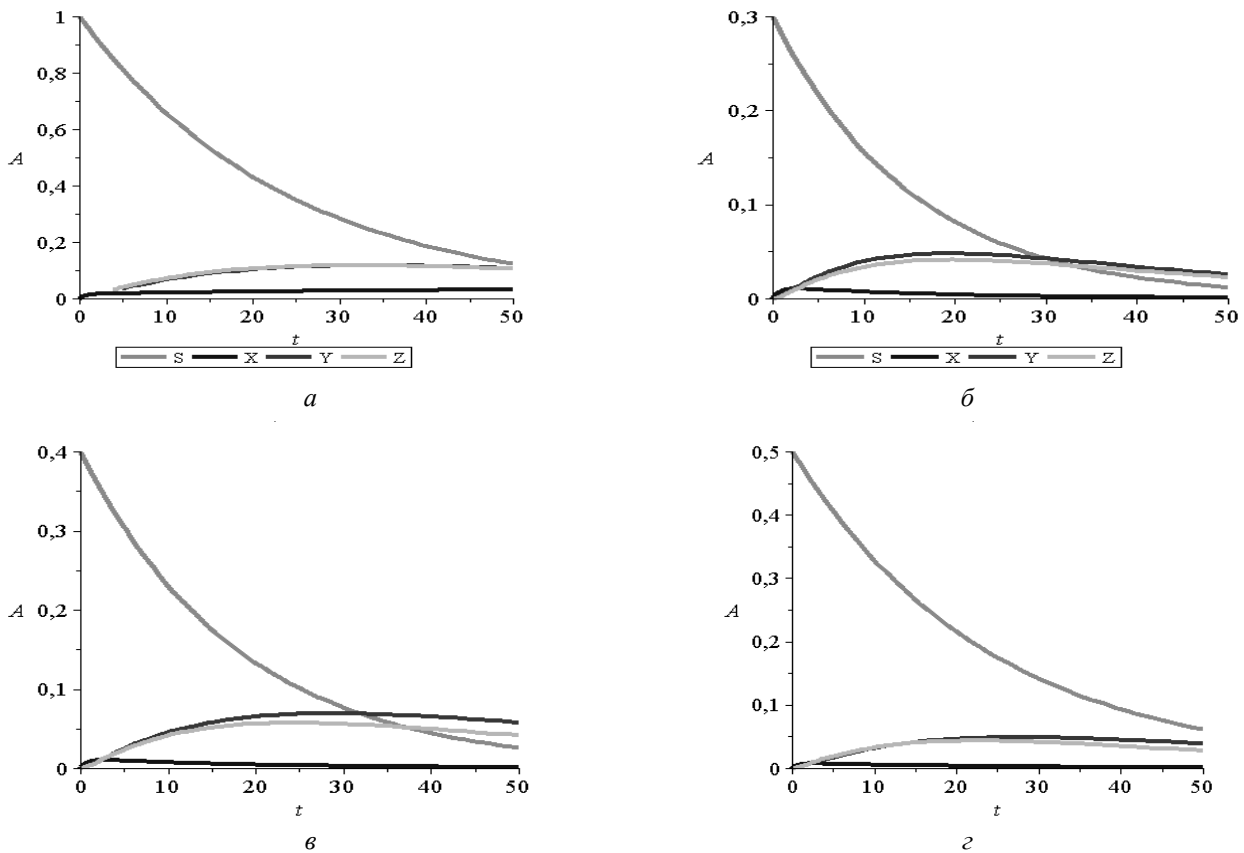


Рис. 3. Накопичення радіонукліда <sup>137</sup>Cs протягом 50 років у компонентах Дідорівського каскаду водойм: а – ставок № 1 (оз. Дідорівка); б – ставок № 2 (оз. Спортивне); в – ставок № 3 (оз. Блакитне); г – ставок № 4 (оз. Гниле). X – вода, Y – донні відкладення, Z – компоненти біоти, S – грунт. По осі абсцис t – термін після аварії, роки; по осі ординат A – відносна активність <sup>137</sup>Cs в компонентах екосистеми (за 1 прийнята активність цезію в ґрунті водозбору ставка № 1).

Як і в базовій моделі, найбільше накопичення  $^{137}\text{Cs}$  спостерігали у ставку № 1 та подальше зменшення концентрації ізотопу вниз по каскаду. Значну роль у накопиченні радіонуклідів відіграють компоненти біоти. У ставку № 1 у біоті накопичується їх навіть більше, ніж у донних відкладеннях. Надалі визначальна роль накопичення переходить до донних відкладень, але роль біоти залишається значною. У моделі радіоактивний розпад  $^{137}\text{Cs}$  враховано в коефіцієнтах переходу, а накопичення у донних відкладеннях пов'язане з постійним стоком  $^{137}\text{Cs}$  з водозбірної площі навколо ставків.

## Висновок

У даній роботі показано принципову можливість за натурними даними верифікувати параметри камерної моделі. Це вказує на адекватність розробленої моделі та можливість використовувати її для прогнозування та реконструкції рівнів забруднення і стану екологічної безпеки біоти у подібному каскаді водоймищ.

Найбільше накопичення радіонуклідів спостерігали у ставку № 1. Надалі вниз по каскаду концентрація в різних компонентах зменшувалась. При цьому у донних відкладеннях вона в усіх ставках була найбільшою.

За запропонованою моделлю можна прогнозувати подальшу динаміку очищення цієї гідросистеми від  $^{137}\text{Cs}$ .

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Ядерная энциклопедия* / Под ред. А. А. Ярошинская. - М.: Благотворительный фонд Ярошинской, 1996. - 656 с.
2. *Кутлахмедов Ю. А., Поликарпов Г. Г., Кутлахмедова-Вишнякова В. Ю.* Применение теории радиоемкости экосистем для экологического нормирования в водных экосистемах // Другий з'їзд гідроекологічного товариства України (Київ, 27 - 31 жовтня 1997 р.) - К., 1997. - С. 167.
3. *Куликов Н.В., Чеботина М.Я.* Радиоэкология пресноводных биосистем. - Свердловск: УрО АН СССР, 1988. - 129 с.
4. *Трапезников А.В., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др.* Миграция радионуклидов в пресноводных и наземных экосистемах. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2007. - Т. 1 - 480 с.
5. *Волкова О.М.* Техногенні радіонукліди у гідробіотах водойм різного типу: автореф. дис. ... д-ра біол. наук / Ін-т гідробіології НАН України. - К., 2008. - 35 с.
6. *Радиогеоэкология водных объектов зоны влияния аварии на ЧАЭС: у 2 т.* / Под ред. О. В. Войцеховича. - К.: Чернобыльинтеринформ, 1997. - Т. 1. - 308 с.
7. *Оценка и регулирование качества окружающей природной среды* / Под ред. А. Ф. Порядина, А. Д. Хованского. - М.: Прибой, 1996. - 350 с.
8. *Павлоцкая Ф.И., Новиков А.П., Горяченкова Т.А. и др.* Формы нахождения радионуклидов в воде и донных отложениях некоторых промышленных водоемов ПО «Маяк» // Радиохимия. - 1998. - Т. 40, № 5. - С. 462 - 467.
9. *Кутлахмедов Ю.А.* Дорога к теоретической радиоэкологии. - К.: Фитосоцицентр, 2015. - 369 с.
10. *Тимофеева-Ресовская Е.А.* Распределение радионуклидов по основным компонентам пресноводных водоемов. - Свердловск: Ин-т биологии УФ АН СССР, 1963. - 78 с.
11. *Кутлахмедов Ю.О., Родина В.В., Матвеева И.В. и др.* Перспективы применения теории радиоемкости и надежности в современной радиоэкологии и экологии // Матеріали наук.-практ. конф. в рамках міжнар. форуму «Довкілля для України», «Радіоекологія-2013. Чорнобиль - Фукусіма. Наслідки» (Київ, 25 - 27 квітня 2013 р.) - Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2013. - С. 64 - 66.
12. *Кутлахмедов Ю.О., Родина В.В., Матвеева И.В. и др.* Оценка состояния биоты экосистем методами теории надежности и радиоемкости // Матеріали міжнарод. конф. «Охорона довкілля та проблеми збалансованого природокористування» (Кам'янець-Подільський, 10 - 11 травня 2011 р.). - Кам'янець-Подільський: Мошинський, 2011. - С. 12 - 14.

**М. А. Кравец, А. О. Побийпеч, Ю. А. Кутлахмедов**

*Национальный авиационный университет, Киев*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДА $^{137}\text{Cs}$ В КАСКАДЕ ДИДОРОВСКИХ ПРУДОВ

Построена базовая модель переноса радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  по каскаду Дидоровских прудов. Проведены мониторинговые исследования каскада. На основе натурных данных уточнена динамика содержания в разных камерах и компонентах системы базовой модели и получена более точная модель переноса  $^{137}\text{Cs}$ .

*Ключевые слова:* камерные модели, изотоп  $^{137}\text{Cs}$ , биота, депонирование радионуклидов, донные отложения, каскад прудов.

M. O. Kravets, A. O. Pobypech, Yu. O. Kutlahmedov

National Aviation University, Kyiv

**MODELING OF THE DISTRIBUTION OF  $^{137}\text{Cs}$  RADIONUCLIDE  
IN THE DIDORIV'S PONDS CASCADE**

Basic model of  $^{137}\text{Cs}$  radionuclide transfer in the Didoriv's ponds cascade was created. Monitoring studies of cascade was conducted. On the basis of the field observation data, dynamics of the basic model holding in different chambers and system components is specified and more accurate model of  $^{137}\text{Cs}$  transfer is obtained.

*Keywords:* chamber model,  $^{137}\text{Cs}$  isotope, biota, depositing of radionuclides, bottom sediments, cascade of ponds.

REFERENCES

1. *Nuclear encyclopedia* / Ed. by A. A. Yaroshinsaya. - Moskva: Blagotvoritel'nyj fond Yaroshinskoj, 1996. - 656 p. (Rus)
2. *Kutlahmedov Yu.A., Polykarpov H.H., Kutlahmedova-Vyshnyakova V. Yu.* Application of the theory of radio capacity of ecosystems to environmental regulation in aquatic ecosystems // Second Congress of Hydroecological Society of Ukraine (Kyiv, 27 - 31 October 1997) - Kyiv, 1997. - P. 167. (Rus)
3. *Kulykov N.V., Chebotyna M.Ya.* Radioecology freshwater ecosystems. - Sverdlovsk: Ural'skoe otdelenie AN SSSR, 1988. - 129 p. (Rus)
4. *Trapeznikov A.V., Molchanova I.V., Karavayeva E.N. et al.* The migration of radionuclides in freshwater and terrestrial ecosystems. - Ekaterinburg: Izdatel'stvo Uralal'skogo universiteta, 2007. - Vol. 1. - 480 p. (Rus)
5. *Volkova O.M.* Radionuclides in hydroreservoirs of various types: Thesis abstract ... Doctor of Biology / Institute of Hydrobiology NAS of Ukraine. - Kyiv, 2008. - 35 p. (Ukr)
6. *Radiogeocology* water bodies affected zone accident at Chernobyl / Ed. by O. V. Voytsekhovych. - Kyiv: Chernobyl'interinform, 1997. - Vol. 1. - 308 p. (Rus)
7. *Evaluation and regulation of environmental quality* / Ed. by A. F. Poryadin, A. D. Khovanskij. - Moskva: Priboj, 1996. - 350 p. (Rus)
8. *Pavlotskaya F.I., Novikov A.P., Goryachenkova T.A. et al.* The forms of radionuclides in water and bottom sediments of some "Mayak" industrial basins // Radiokhimiya. - 1998. - Vol. 40, No. 5. - P. 462 - 467. (Rus)
9. *Kutlahmedov Yu.O.* Road to theoretical radioecology. - Kyiv: Fitosotsiotsentr, 2015. - 369 p. (Rus)
10. *Timofeeva-Resovskaya E.A.* distribution of radioisotopes for the major components of freshwater. - Sverdlovsk: Institut biologii UF AN SSSR, 1963. - 78 p. (Rus)
11. *Kutlahmedov Yu.O., Rodina V.V., Matveeva I.V. et al.* Prospects of radiocapacity and reliability theory in modern radio-ecology and environmental // Proc. of the Conf. in the Int. Forum "Environment for Ukraine", "Radiology 2013. Chernobyl - Fukushima. Consequences" (Kyiv, 25 - 27 April 2013) - Zhytomyr: Vydavnytstvo Zhytomyr'skogo derzhavnogo universytetu imeni I. Franka, 2013. - P. 64 - 66. (Rus)
12. *Kutlahmedov Yu.O., Rodina V.V., Matveeva I.V. et al.* Assessment of the biota of ecosystems and methods of reliability theory radiocapacity // Proc. of the Int. Conf. "Environmental issues and sustainable nature" (Kamenetz-Podilskyj, 10 - 11 May 2011). - Kamenets-Podilsk: Moshynskyy, 2011. - P. 12 - 14. (Rus)

Надійшла 12.04.2016  
Received 12.04.2016