

УДК 577.34:[(546.42+546.36):574.63] (285)

ФОРМИ ВМІСТУ РАДІОНУКЛІДІВ У ДОННИХ ВІДКЛАДЕННЯХ І ВИЩІЙ ВОДЯНІЙ РОСЛИННОСТІ ОЗЕРНИХ ЕКОСИСТЕМ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ**Х. Ганжа, В. Кленус, Д. Гудков***Інститут гідробіології НАН України
просп. Героїв Сталінграда, 12, Київ 04210, Україна
e-mail: krisgan@rambler.ru*

Проведено дослідження фізико-хімічних форм знаходження ^{90}Sr і ^{137}Cs в донних відкладеннях і вищих водяних рослинах найбільш забруднених озер Чорнобильської зони відчуження. Вивчено перерозподіл радіонуклідів між основними компонентами екосистеми.

Ключові слова: донні відкладення, вища водяна рослинність, радіонукліди, зона відчуження Чорнобильської АЕС.

У замкнених водоймах зони відчуження Чорнобильської АЕС (ЧАЕС) впродовж останнього десятиліття спостерігаються підвищені рівні забруднення ^{90}Sr внаслідок поступового руйнування та вилуговування радіонукліда з частинок ядерного палива, які потрапили в навколишнє середовище унаслідок аварії на ЧАЕС. У той же час ^{137}Cs залишається міцно зв'язаним малорухливими формами глинистих мінералів ґрунтів [1]. На жаль, у доступних літературних джерелах недостатньо відображене питання переходу радіонуклідів із донних відкладень і водяної рослинності у воду, тому вивчення форм біогеохімічної міграції та джерел надходження радіонуклідів у водні екосистеми є важливим завданням для розуміння механізмів перерозподілу, а також для прогнозування потенційної міграційної здатності радіонуклідів в основних компонентах водних екосистем.

Метою даної роботи було дослідити фізико-хімічні форми знаходження ^{90}Sr і ^{137}Cs у донних відкладеннях і вищих водяних рослинах найбільш забруднених озер ЧАЕС.

Проби донних відкладень і зразки рослини куширу темно-зеленого (*Ceratophyllum demersum* L.) відбирали протягом 2007–2008 рр.

Для відбору проб донних відкладень використовували секційний пробовідбірник СДЧ-100. Зразки куширу темно-зеленого відбирали з водяної поверхні у період вегетації. Форми знаходження ^{90}Sr та ^{137}Cs в донних відкладах і у рослинах *Ceratophyllum demersum* L. визначали методом послідовної екстракції підготовлених проб розчинами різних реагентів. Метод дає можливість розділити препарати на фракції за фізико-хімічними формами, в яких перебувають радіонукліди [7]. Екстракцію радіонуклідів із донних відкладень проводили в такій послідовності: 1) обмінну форму – розчином $\text{CH}_3\text{COONH}_4$; 2) карбонатну форму – розчином $\text{CH}_3\text{COONH}_4 + \text{HNO}_3$; 3) форму, зв'язану з гідроксидами й оксидами металів, – розчином $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl} + \text{CH}_3\text{COOH}$; 4) форму, зв'язану з органічною речовиною і сульфідами, – розчином 35% $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_3$; 5) нерозчинну форму – розчином концентрованої HCl . Екстракцію радіонуклідів із рослинних тканин проводили в такій послідовності: 1) розчинені позаклітинні катіони – дистильованою H_2O ; 2) сорбовані позаклітинні слабкозв'язані катіони – розчином NiCl_2 ; 3) сорбовані позаклітинні катіони – розчином EDTA ; 4) внутрішньоклітинні катіони – розчином HNO_3 (1М); 5) вбудовані катіони – розчином 35% $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_3$; 6) мінеральна фракція – розкладення малорозчинного залишку розчином концентрованої HCl .

Вимірювання ^{137}Cs проводили у пробах на гамма-спектрометрі SBS-30 з германій-літєвим детектором, ефективність 1%, роздільна здатність 3–4 кеВ за енергією 1333 кеВ кобальту-60. Виділення ^{90}Sr проводили радіохімічно. Вимірювали активність на установці малого фону УМФ-2000 з кремнієвим йонно-імплантованим детектором [4].

Озеро Глибоке розташоване на території лівобережної заплави р. Прип'ять на відстані 7 км від ЧАЕС. Озеро є сліпим відгалуженням Красненської стариці. Озеро Далеке-1 розташоване за 3 км від оз. Глибоке. Обидва озера розташовані на території одамбованої ділянки в ближній зоні ЧАЕС і відрізняються високим вмістом радіонуклідів у всіх компонентах екосистеми [3].

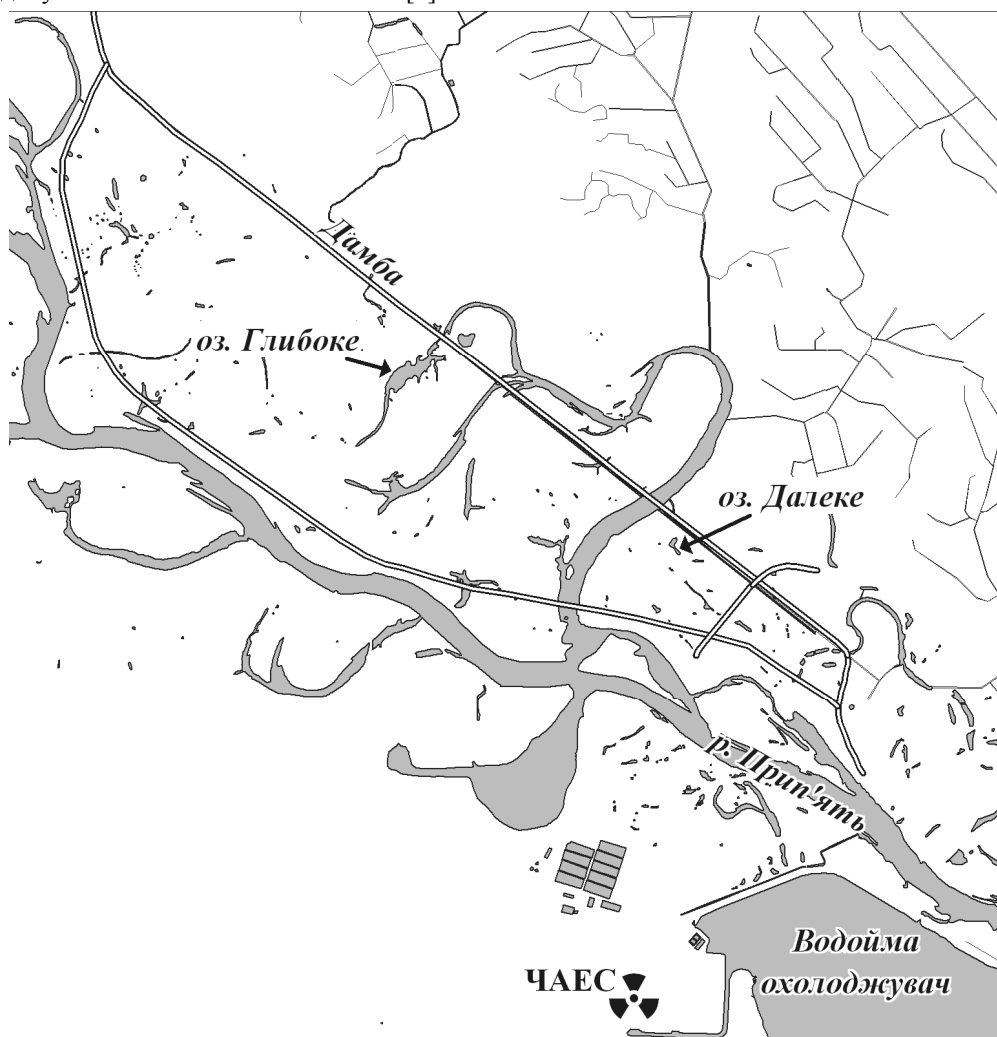


Рис. 1. Карта розташування досліджуваних водойм.

Упродовж післяаварійного періоду в Чорнобильській зоні відчуження спостерігаються зміни фізико-хімічних форм і динаміка радіонуклідного забруднення у водних екосистемах. Відбуваються зміни мобільності радіонуклідів і їхньої біологічної доступ-

ності, а також пов'язаний із цим перерозподіл у компонентах водних екосистем. Радіонукліди у водних екосистемах переважно сконцентровані в донних відкладеннях [2, 5]. У результаті виконаних досліджень з'ясовано, що фізико-хімічні форми радіонуклідів у донних відкладеннях і вищих водяних рослинах виявляють різну рухливість. Відомо, що контрастність техногенних аномалій рухомих форм металів збільшується в ряду: валові форми – обмінні форми – органо-мінеральні форми – карбонатні форми – форми, пов'язані з гідроксидами і оксидами металів [6].

Результати валового аналізу ^{90}Sr та ^{137}Cs у різних шарах донних відкладень подані в табл. 1.

Таблиця 1

Питома активність ^{90}Sr та ^{137}Cs в різних шарах донних відкладень, Бк/кг

Шар донних відкладень, см	^{90}Sr	^{137}Cs
0–5	64510	766600
5–10	44720	972020
10–15	24160	187350
15–20	930	8420

Рухливість ^{90}Sr і ^{137}Cs в донних відкладеннях озер і ґрунтах залежить від вмісту органічної речовини та форм знаходження радіонуклідів у водних екосистемах [5]. Результати валового аналізу показали (табл. 1), що вміст ^{90}Sr в донних відкладеннях зменшується із заглибленням у шар досліджуваного керна. Валовий вміст ^{137}Cs щодо ^{90}Sr вниз по профілю донних відкладень значно більший. Згідно з даними літератури, радіоактивність мобільних форм ^{137}Cs у субстраті залежить від вмісту глинистих мінералів і їхніх органо-мінеральних форм, які активно поглинають ^{137}Cs [6]. Завдяки цим властивостям ^{137}Cs має значно меншу міграційну здатність порівняно з ^{90}Sr . За отриманими нами коефіцієнтами відношення валового вмісту $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ в шарах донних відкладень спостерігається збіднення відносного вмісту ^{90}Sr по профілю. Так, у шарі 10–15 см $K_{90\text{Sr}/^{137}\text{Cs}}$ становить 0,13, що найбільше відповідає відношенню цих радіонуклідів у аварійному викиді 4-го блоку ЧАЕС 1986 р. У шарах 0–5, 5–10, 15–20 см $K_{90\text{Sr}/^{137}\text{Cs}}$ значно менший, ніж у викидах на момент аварії. Спостережено також високу активність ^{137}Cs у шарі 5–10 см, це може бути пов'язано з тим, що цей шар утворився у процесі мулонакопичення в період 1986 р.

У табл. 2 і 3 наведено результати аналізу розподілу фізико-хімічних форм ^{90}Sr та ^{137}Cs у різних шарах донних відкладень. Проведені дослідження показали, що варіабельність ^{137}Cs найбільша в органо-мінеральній фракції, найменша у фракції, пов'язаній з оксидами і гідроксидами металів. У ^{90}Sr найбільша варіабельність спостерігається в обмінній формі, тоді як карбонатна та пов'язана з оксидами і гідроксидами фракції проявляють коефіцієнти варіації однаковою і найменшою мірою. Отримані дані свідчать про більшу мобільність ^{90}Sr щодо ^{137}Cs .

За даними проведених спостережень, ^{137}Cs переважно концентрується в нерозчинній формі у всіх шарах донних відкладень, крім 5-10 см. Найменше він зв'язується у карбонатній формі. Вміст ^{90}Sr в нерозчинній формі у всіх шарах розрізу донних відкладень найменший, тоді як в обмінних формах він переважає. Це пов'язано з більшою хімічною рухливістю ^{90}Sr .

Таблиця 2

Розподіл ¹³⁷Cs по фракціях у різних шарах донних відкладень

Фракція	Цезій-137, %				C _v , %
	0–5 см	5–10 см	10–15 см	15–20 см	
Обмінна	30,8	20,5	27,9	21,8	60
Карбонатна	4,5	3,2	2,8	3	60
Зв'язана з гідроксидами й оксидами металів	8,5	5,3	7,1	8,5	47
Зв'язана з органічною речовиною та сульфідами	21,9	40,7	27,6	23,4	47
Нерозчинна	34,3	30,3	34,6	43,3	51

Таблиця 3

Розподіл ⁹⁰Sr по фракціях у різних шарах донних відкладень

Фракція	Стронцій-90, %				C _v , %
	0–5	5–10	10–15	15–20	
Обмінна	6,4	4,5	38,6	41,4	115
Карбонатна	32,4	9,3	9,6	6,1	71
Зв'язана з гідроксидами й оксидами металів	10	3,2	8	7	71
Зв'язана з органічною речовиною та сульфідами	46,8	41,2	42,5	41,8	91
Нерозчинна	4,4	1,8	1,3	3,7	95

Отримані результати аналізу зразків куширу темно-зеленого показали значний вміст ¹³⁷Cs в орґано-мінеральній фракції та малорозчинному залишку (табл. 4). Найбільший вміст ⁹⁰Sr зафіксовано у фракціях сорбованих позаклітинних слабкозв'язаних та внутрішньоклітинних катіонів. У водорозчинній фракції вміст ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr мінімальний. Варіабельність ⁹⁰Sr у вищих водяних рослинах значно більша, ніж ¹³⁷Cs. Найбільший коефіцієнт варіації ⁹⁰Sr виявлено в малорозчинному залишку. Найменша варіабельність ¹³⁷Cs зафіксована в орґано-мінеральній фракції, тоді як найбільша – в сорбованих позаклітинних слабкозв'язаних катіонах і у внутрішньоклітинних катіонах. Такий розподіл показує, що при відмиранні рослин значна частка ¹³⁷Cs (21%), яка перебуває в нерозчинній формі, перейде у донні відклади і стане важкодоступною для міграційних процесів. Найбільша частка ¹³⁷Cs (40%), яка міститься у вбудованих катіонах, буде поступово переходити в донні відкладення і по мірі трансформації органічної речовини – залучатися в міграційні процеси у системі «донні відкладення – вода», 19% ¹³⁷Cs перейде у воду. Близько 5% ⁹⁰Sr, який міститься у слабкорозчинному залишку, перейде у донні відкладення. 49% ⁹⁰Sr, які містяться у вбудованих та у внутрішньоклітинних катіонах, по мірі відмирання рослин поступово переходитимуть у донні відкладення, 44%, які містяться в геохімічно рухомих формах, будуть брати участь в обмінних процесах у системі «гідробіоти – вода», і 2% перейде у воду. ⁹⁰Sr, на відміну від ¹³⁷Cs, меншою мірою пе-

реходить у важкодоступні для геохімічної міграції форми і переважно перебуває у мобільному стані.

Таблиця 4

Розподіл ^{137}Cs та ^{90}Sr по фракціях *Ceratophyllum demersum* L., %

Фракція*	^{137}Cs			C_v	^{90}Sr			C_v
	Мінімум	Середнє	Максимум		Мінімум	Середнє	Максимум	
1	3	8	14	62	1,4	2	5	56
2	0,9	11	32	117	0,4	26	59	90
3	4	10	21	73	2,6	18	31	59
4	0,3	10	27	12,8	115	30	54	57
5	32	40	46	16	0,9	19	36	70
6	0,6	21	36	69	0,2	5	27	202

Примітка. * 1) розчинені позаклітинні катіони; 2) сорбовані позаклітинні катіони слабкозв'язані; 3) сорбовані позаклітинні катіони; 4) внутрішньоклітинні катіони; 5) вбудовані катіони; 6) мінеральна фракція.

Таким чином, аналіз фізико-хімічних форм радіонуклідів у донних відкладеннях показав переважний вміст ^{90}Sr і ^{137}Cs в іонообмінній формі та формі, зв'язаній з органічною речовиною і сульфідами. Оскільки ^{90}Sr характеризується слабкою здатністю до утворення фіксованих форм, його вміст в обмінних формах є значним. ^{137}Cs утворює фіксовані форми з донними відкладеннями, тому його вміст значно більший у нерозчинній формі, порівняно зі ^{90}Sr . ^{90}Sr , на відміну від ^{137}Cs , меншою мірою переходить у важкодоступні для геохімічної міграції форми і переважно перебуває у мобільному стані.

На прикладі *Ceratophyllum demersum* L. з'ясовано, що у занурених вищих водяних рослинах ^{137}Cs міститься переважно в органічно-мінеральній фракції та малорозчинному залишку, що свідчить про поступовий перехід ^{137}Cs у донні відкладення. Найбільший вміст ^{90}Sr зафіксовано у фракціях сорбованих позаклітинних слабкозв'язаних та внутрішньоклітинних катіонів. Таким чином, ^{90}Sr міститься переважно у мобільних формах і легкодоступний для міграційних процесів. У водорозчинній фракції вміст ^{137}Cs і ^{90}Sr мінімальний.

1. 20 років Чорнобильської катастрофи. Погляд у майбутнє: Національна доповідь України. К.: Атіка, 2006. 224 с.
2. Гудков Д. И., Деревець В. В., Зуб Л. Н. та ін. Радіонукліди ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ і ^{241}Am в компонентах озерних екосистем Красненской поймы р. Припяти // Гидробиол. журн. 2005. Т. 41. № 1. С. 76–91.
3. Кузьменко М. І., Романенко В. Д., Деревець В. В. та ін. Радіонукліди у водних екосистемах України. К.: Чорнобильінтерінформ, 2001. 318 с.
4. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / О.М. Арсан, О.А. Давидов, Т.М. Дьяченко та ін.; За ред. В.Д. Романенка. НАН України. Ін-т гідробіології. К.: ЛОГОС, 2006. 408 с.

5. Соботович Е. В., Ольховик Ю. О., Коромисличенко Т. І., Соколик Г. А. Порівняльна характеристика міграційної здатності радіонуклідів у донних відкладах водоймищ ближньої зони Чорнобильської АЕС // Доп. АН УРСР. Сер. Б. Геол., хім. та біол. науки. 1990. № 8. С. 12–16.
6. Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во МГУ, 1995. 336 с.
7. Tessier A., Campbell P. G. C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particular trace metals // Anal. Chem. 1979. Vol. 51. P. 844–851.

THE FORMS OF RADIONUCLIDE ACCUMULATION BY COMPONENTS OF LAKE ECOSYSTEM OF CHERNOBYL EXCLUSION ZONE

Ch. Ganzha, V. Klenus, D. Gudkov

*Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine
12, Geroyiv Stalingrada Ave., Kiev 04210, Ukraine
e-mail: krisgan@rambler.ru*

The research of physicochemical formslocation of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the bottom sediments and higher aquatic plants of the most contaminated lakes of the Chernobyl exclusion zone. The redistribution of radionuclides is studied between the basic components of ecosystem.

Key words: bottom sediment, higher aquatic plants, radionuclide's, Chernobyl NPP exclusion zone.

ФОРМЫ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И ВЫСШЕЙ ВОДНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ

К. Ганжа, В. Кленус, Д. Гудков

*Институт гидробиологии НАН Украины
просп. Героев Сталинграда, 12, Киев 04210, Украина
e-mail: krisgan@rambler.ru*

Проведены исследования физико-химических форм нахождения ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях и высших водных растениях наиболее загрязненных озер Чернобыльской зоны отчуждения. Изучено перераспределение радионуклидов между основными компонентами экосистемы.

Ключевые слова: донные отложения, высшая водная растительность, радионуклиды, зона отчуждения Чернобыльской АЭС.

Стаття надійшла до редколегії 25.02.10
Надійшла після доопрацювання 07.06.10
Прийнята до друку 16.06.10