

УДК 614.876.4:574.52(477.83)

Оцінка дози радіаційного опромінення повітряно-водяних рослин у різнотипних водоймах Полісся

Скиба В.В.¹ , Волкова О.М.² , Беляєв В.В.² , Пришляк С.П.² ¹ Білоцерківський національний аграрний університет² Інститут гідробіології НАН України

E-mail: Скиба В.В. volly2005@ukr.net; Волкова О.М. 2volkovaen@gmail.com



Скиба В.В., Волкова О.М., Беляєв В.В., Пришляк С.П. Оцінка дози радіаційного опромінення повітряно-водяних рослин у різнотипних водоймах Полісся. «Агробіологія», 2023. № 2. С. 230–239.

Skyba V., Volkova O., Belyaev V., Pryshlyak S. Assessment of the radiation exposure dose in air-water plants of various water body types in Polissia. «Agrobiology», 2023. no. 2, pp. 230–239.

Рукопис отримано: 05.09.2023 р.

Прийнято: 16.09.2023 р.

Затверджено до друку: 23.11.2023 р.

doi: 10.33245/2310-9270-2023-183-2-230-239

Метою дослідження було визначити закономірності опромінення повітряно-водяних рослин у водоймах Полісся, які розташовані на територіях з різним рівнем радіонуклідного забруднення площі водозбору та оцінити ризик радіаційного ураження повітряно-водяних рослин за вмістом радіонуклідів у донних відкладах водойм.

Для визначення закономірностей формування дози опромінення повітряно-водяних рослин використані результати досліджень 2014–2020 рр. щодо питомої активності ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs у воді, донних відкладах та сукупність даних щодо вмісту радіонуклідів у надземних органах, кореневищах та коренях *Phragmites australis* (Cav.) Trin. I *Typha angustifolia* L. в екосистемах водойм поза межами зони відчуження – Київського (с. Страхолісся) та Повчанського (с. Повч, Коростенський р-н Житомирської обл.) водосховищ, оз. Біле (с. Біле, Вараський р-н Рівненської обл.) та оз. Лісове (с. Нова Марковка, Вишгородський р-н Київської обл.); у зоні відчуження – оз. Глибокого, Янівського затону та усереднення пробах з двох водойм, які утворилися за осушення водойми-охолоджувача ЧАЕС.

Питому активність ⁹⁰Sr у зразках визначали оксалатним методом, ¹³⁷Cs – гамма-спектрометричним методом у відділі водної радіоекології Інституту гідробіології НАН України. За визначення величин потужності дози опромінення рослин враховували неоднорідність середовища їх існування, ослаблення γ-випромінювання водними масами та біомасу і рівні радіонуклідного забруднення надземних та підземних органів повітряно-водяних рослин.

Встановлено, що на період досліджень величина потужності дози зовнішнього γ-опромінення підводних органів повітряно-водяних рослин, що формується зосередженим у водних масах ¹³⁷Cs, у 100 та більше разів менша, ніж величина потужності дози від випромінювання ¹³⁷Cs, акумульованого у донних відкладах, тобто за визначення загальної дози нею можна знехтувати.

У досліджених водоймах зони відчуження потужність дози зовнішнього опромінення повітряно-водних рослин становила 7,5–271 мкГр/добу, за межами зони відчуження – 0,1–33 мкГр/добу.

Потужність дози внутрішнього опромінення повітряно-водяних рослин водойм зони відчуження становила 1,2–50 мкГр/добу, за межами зони відчуження – 0,01–15 мкГр/добу.

Загальна потужність дози опромінення повітряно-водних рослин водойм зони відчуження становила 9–289 мкГр/добу, у водоймах за межами зони відчуження – 0,65–48 мкГр/добу.

У водоймах поза межами зони відчуження внесок зовнішньої складової до загальної потужності дози становив від 69 до 81 %, у водоймах зони відчуження – від 69 до 78 %.

Визначені рівні вмісту радіонуклідів у донних відкладах, які відповідають різному ступеню прояву радіобіологічних ефектів у повітряно-водяних рослин. Встановлено, що рослини більшості водойм, зокрема Київського водосховища, розвиваються за умов зон радіаційного благополуччя та фізіологічного маскування, у деяких водоймах зони відчуження – за умов зони екологічного маскування.

Ключові слова: повітряно-водяні рослини, потужність дози, донні відклади, радіонукліди.

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Внаслідок дії іонізуючого випромінювання у живих організмів можуть формуватися детерміновані і стохастичні радіобіологічні ефекти. Вільні радикали, що виникають в результаті іонізації, призводять до руйнування цілісності макромолекул, що спричиняє канцерогенні та мутагенні ефекти, які можуть призвести до масової загибелі клітин і організму загалом. Рівні ураження живих організмів визначаються величиною поглиненої дози.

Система, яка створена для нормування радіаційного чинника насамперед орієнтована на людину, тому й методи визначення поглиненої дози розроблялися з урахуванням середовища існування та структури організму людини. Значно менше уваги приділяли визначенню дозових навантажень на водні організми.

Серед гідробіонтів найбільш чутливими до дії іонізуючого випромінювання вважаються представники іхтіофауни. Доза опромінення, що спричиняє LD_{50} у риб коливається у межах 6–55 Гр., тому дослідженням стану іхтіофауни та дозовим навантаженням на організм риб водойм, що перебувають під впливом хронічного радіонуклідного забруднення приділяли особливу увагу [1, 6, 18, 19, 22, 23]. У риб водойм зони відчуження виявлені порушення морфології гонад, укорочення щелеп, зябрових кришок, порушення будови хребта, порушення клітин периферичної крові [6, 10, 17, 18, 19, 20, 23].

Рослини вважаються менш сприйнятливими, зокрема, LD_{50} у злакових, до яких належать такі розповсюджені види повітряно-водних рослин як очерет звичайний і лепешняк великий, визначена у межах величин 10–160 Гр. [9]. Однак у рослинах водойм зони відчуження виявлені численні порушення, які дослідники пов'язують з радіаційним чинником. Основною причиною загибелі клітин за дії іонізуючого випромінювання вважаються структурні uszkodження молекул ДНК. На сьогодні встановлено кореляційну залежність між частотою хромосомних аберацій у меристемних тканинах ґрунтових коренів повітряно-водних рослин та величиною поглиненої дози [13, 18, 19, 20, 24, 27, 28]. Визначені відхилення від норми деяких морфологічних показників репродуктивних органів очерету звичайного і зниження його фактичної насінневої продуктивності [14, 22, 29]. Зрозуміло, що для встановлення достовірної залежності «доза – ефект» у рослинах забруднених радіонуклідами природних водойм необхідний коректний розрахунок величини

доз опромінення органів і тканин. Щодо повітряно-водних рослин, за визначення величини дози їхнього опромінення виникали певні труднощі, оскільки найбільш поширені методології розрахунку дози опромінення [16, 21] як референтного виду використовують водоперицю колосисту, представлену еліпсоїдом обертання з малими осями 1 і 2 мм, також прийнято, що всі органи рослин знаходяться в однорідно забрудненому середовищі і не відрізняються питомою активністю та лінійними розмірами, а в об'ємі рослини реалізується приблизно третя частина енергії β -випромінювання ^{137}Cs .

На відміну від занурених, органи повітряно-водних рослин розташовані у середовищах різної щільності та питомої активності радіонуклідів – повітрі, воді та донних відкладах. Відповідно, умови опромінення підземних, підводних та надводних органів кардинально відрізняються. Крім того, за даними [16, 21] не враховано неоднорідність середовища існування рослин, ослаблення γ -випромінювання водними масами та встановлено [30] закономірність щодо різних рівнів радіонуклідного забруднення надземних та підземних органів повітряно-водних рослин.

Застосування методів та підходів до визначення величини дози опромінення повітряно-водних рослин, які наведені у [2, 3, 4, 15], дозволить враховувати зазначені вище чинники формування дозових навантажень на окремі органи та тканини рослин і на організм загалом.

Метою дослідження було визначити закономірності опромінення повітряно-водних рослин у водоймах Полісся, які розташовані на територіях з різним рівнем радіонуклідного забруднення площі водозбору та оцінити ризик радіаційного ураження повітряно-водних рослин за вмістом радіонуклідів у донних відкладах водойм.

Матеріал і методи дослідження. Для визначення закономірностей формування дози опромінення повітряно-водних рослин використані результати досліджень 2014–2021 рр. щодо питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs в абіотичних компонентах та очереті звичайному – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. і рогозі вузьколистому – *Typha angustifolia* L. в екосистемах наступних водойм: поза межами зони відчуження – Київського (с. Страхолища) та Повчанського (с. Повч, Коростенський р-н Житомирської обл., 51,133°N, 28,529°E) водосховищ, оз. Біле (с. Біле, Вараський р-н Рівненської обл., 51,648°N, 26,024°E) та оз. Лісове (с. Нова Марковка, Вишгородський

р-н Київської обл., 51,133°N, 29,468°E); у зоні відчуження – оз. Глибокого (51,444°N, 30,064°E), Янівського затону (51,409°N, 30,084°E) та усереднених пробах з двох водойм, які утворилися за осушення водойми-охолоджувача ЧАЕС (ВОЧАЕС), за генезисом ці водойми назвали стара тепла частина та нова тепла частина.

Досліджені водойми розташовані на територіях, які відрізняються за щільністю радіонуклідного забруднення (табл. 1).

Питому активність ^{90}Sr у зразках визначали оксалатним методом, ^{137}Cs – гамма-спектрометричним методом [8] у відділі водної радіоекології Інституту гідробіології НАН України. У роботі наведені середні величини питомої активності радіонуклідів для двох досліджуваних видів рослин.

Дозові навантаження на рослини визначали за [2, 3, 4, 15].

Потужність зовнішнього γ -опромінювання окремих органів визначали за формулою:

$$P_k = z_k \sum C_{(i)} Kd_{(i)}, i = 1, n \quad (1)$$

де $C_{(i)}$ – концентрація i -го радіонукліда у воді або донних відкладах, Бк/л, або Бк/кг природної вологості;

z_k – геометричний коефіцієнт, який враховує умови опромінення;

$Kd_{(i)}$ – дозовий коефіцієнт i -го радіонукліда, (Гр/добу)/(Бк/кг).

Потужність дози внутрішнього опромінення визначали за формулою:

$$P = SC_{ij} K(\beta)_i g_j, i=1, n, \quad (2)$$

де C_{ij} – концентрація i -го радіонукліда у j -тому органі, Бк/кг;

$K(\beta)_i$ – дозовий коефіцієнт i -го радіонукліда (γ - та β -випромінювання), (Гр/добу)/(Бк/кг);

g_j – коефіцієнт, що враховує яка частина енергії β -часток реалізується у j -тому органі.

Загальну потужність дози на організм рослин розраховують сумуванням, з відповідним ваговим коефіцієнтом, величин потужності дози, які отримують окремі органи або тканини рослин через зовнішнє та внутрішнє опромінення:

$$P_{\Sigma} = \sum P_i w_i, i = 1, k \quad (3)$$

де P_{Σ} – загальна потужність поглиненої рослиною дози;

P_i – потужність поглиненої дози у i -му органі;

w_i – відносний ваговий коефіцієнт i -го органа;

k – кількість органів.

Для обчислення дозових навантажень використовували результати щодо питомої активності радіонуклідів у надземних органах, додаткових ґрунтових коренях та кореневищах рослин. Для такого розбиття коефіцієнти w_i співпадають з відносною біомасою відповідних органів, а k дорівнює 3. Величини дозових навантажень на підземну частину і загалом на фітомасу рослин визначали з урахуванням усередненої відносної фітомаси надземних (50 %) та підземних (кореневища – 36 %, корені – 14 %) органів.

Прийнято, що для повітряно-водяних рослин відношення мас за природної вологості та повітряно-сухої дорівнює 3.

Вважали, що зовнішнім β -випроміненням ^{137}Cs для надземної частини та кореневищ можна знехтувати, для коренів приймали, що за β -випроміненням ^{137}Cs вони знаходяться у рівноважному стані з донними відкладами. Для β -випромінення ^{137}Cs вважали, що вся енергія цих часток реалізується у кореневищах та надземних органах. Обрані нами розміри коренів приблизно відповідають розмірам водних рослин за [21], тому ми, як запропоновано авторами публікації, приймали, що у коренях реалізується 30 % енергії β -випромінення інкорпорованого ^{137}Cs .

Таблиця 1 – Щільність забруднення площі водозбору досліджених водойм, кБк/м² (за 25 років..., 2011)

Водойма	^{137}Cs	^{90}Sr
ВОЧАЕС	більше 18500	більше 18500
Оз. Глибоке	20000–40000	20000–40000
Янівський затон	більше 18500	більше 18500
Оз. Лісове	185–1850	2–10
Київське водосховище*	2–40000	2–40000
Повчанське водосховище	100–1850	2–20
Оз. Біле	40–185	1–4

Примітка. * – водойми зони відчуження знаходяться на площі водозбору Київського водосховища.

Для коректного розрахунку дози на надземні органи рослин застосували наступний методичний підхід: частину рослини, яка знаходиться у воді, по вертикалі розбивали на окремі ділянки, в межах яких можна вважати, що опромінення частини рослини однакове; далі визначали вплив γ -випромінення донних відкладів на цих ділянках, тобто розраховували зовнішнє дозове навантаження та визначали відносну вагу цих ділянок; остаточною кроком було сумування внеску окремих ділянок у формування дози зовнішнього опромінення на надземні органи рослини.

Результати досліджень та їх обговорення.

Дозу зовнішнього опромінення визначали за даними щодо вмісту радіонуклідів у воді та донних відкладах на ділянках монодомінантних заростей повітряно-водяних рослин (табл. 2).

Розрахунки показали, що величина потужності дози підводних органів рослин, що обумовлена випромінюванням зосереджених у водних масах та донних відкладах радіонуклідів, становила відповідно 0,05–156 та 10–102000 нГр/добу. Отже, дозу опромінення рослин, яка формується радіонуклідами водних мас, можна не враховувати (табл. 3). Необхідно зазначити, що у разі розвитку рослин на глибині 50 см потужність дози зовнішнього опромінювання їх надземних органів буде у кілька разів вищою, ніж на глибині 150 см, що пояснюється поглинанням випромінювання водними масами.

Величину потужності дози внутрішнього опромінення рослин визначали згідно з формулою (2) за питомою активністю радіонуклідів у надземних та підземних органах (табл. 4, 5).

Таблиця 2 – Активність радіонуклідів у водних масах (Бк/м³) та донних відкладах (кБк/кг природної вологості)

Водойма	Вода, Бк/м ³		Донні відклади, кБк/кг	
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Київське водосховище	4,3–42,8	4,4–58,5	0,002	0,03
Повчанське водосховище	7,6–8,4	8,4–11,6	0,002	0,2
Оз. Біле	18,2–26,4	67,4–138,2	0,0005	0,13
Оз. Лісове	10–100	100–4000	0,01	0,2–6,0
ВОЧАЕС	500–4000	1000–6000	1,0–3,9	12,1 – 48,0
Оз. Глибоке	100000	20000	1,4–14,4	2,6–26,7
Янівський затон*	1000	1000	0,6	1,1

Примітка. * – визначено за [11] з урахуванням радіоактивного розпаду.

Таблиця 3 – Потужність дози зовнішнього γ -опромінення підводних органів гелофітів, що формується зосередженим у водних масах ($P_{\text{вод}}$) та донних відкладах ($P_{\text{дн}}$) ¹³⁷Cs, нГр/добу

Водойма	$P_{\text{вод}}$	$P_{\text{дн}}$	
		$h^*=0,5$ м	$h=1,5$ м
Київське водосховище	0,05–0,8	57–141	10–50
Повчанське водосховище	0,07–0,1	311	111
Оз. Біле	0,5–1,1	371	133
Оз. Лісове	0,78–31,2	440–12700	160–4500
ВО ЧАЕС	7,8–46,8	25400–102000	–**
Оз. Глибоке	156	5400–56100	1900–20000
Янівський затон	7,8	2400	860
Оз. Лісове	0,78–31,2	440–12700	160–4500

Примітка. * – шар водних мас над донними відкладами;

** – на глибинах 1,5 м повітряно-водяні рослини не зустрічаються.

Таблиця 4 – Питома активність ^{90}Sr у надземних та підземних органах рослин, Бк/кг

Водойма	Надземні органи	Кореневища	Корені
Київське водосховище	1,8–15,7	2,4–15,4	15,1–240
Повчанське водосховище	0,7–8	3,6–13	2,4–105
Оз. Біле	3,4–17	1,8–32,8	3,2–7,7
Оз. Лісове	3,8–198	0,7–3	2,8–297
ВОЧАЕС	24–597	20–337	109–668
Оз. Глибоке	362–11100	179–1850	209–18700
Янівський затон	197–493	41–1390	477–2888

Таблиця 5 – Питома активність ^{137}Cs у надземних та підземних органах рослин, Бк/кг

Водойма	Надземні органи	Кореневища	Корені
Київське водосховище	3,4–96	14,2–187	73–451
Повчанське водосховище	5,3–102	24–75	122–443
Оз. Біле	33,2–198	36–115	91–3410
Оз. Лісове	35–10000	340–2200	4743–28566
ВОЧАЕС	31–10480	280–12512	1670–14942
Оз. Глибоке	368–21379	476–5752	8790–90633
Янівський затон	219–1184	265–705	4420–9856

Отже, з урахуванням лінійних розмірів органів рослин, їх питомої активності та особливостей розповсюдження іонізуючого випромінювання розрахована загальна потужність опромінення повітряно-водяних рослин у різних водоймах з різними рівнями радіоактивного забруднення компонентів екосистеми (табл. 6).

Розрахунки показали, що у різних водоймах які розташовані як поза межами, так і у зоні відчуження, величина потужності дози зовнішнього опромінення повітряно-водяних рослин перевищувала величину дози внутрішнього. У водоймах поза межами зони відчуження внесок зовнішньої складової до загальної потужності дози становив від 69 до 81 %, у водоймах зони відчуження – від 69 до 78 %.

Таблиця 6 – Потужність дози опромінення повітряно-водяних рослин, мкГр/добу

Водойма	Зовнішнє	Внутрішнє	Загальне
Київське водосховище	0,1–0,2	0,01–0,05	0,1–0,3
Повчанське водосховище	0,6–0,7	0,03–0,15	0,65–0,85
Оз. Біле	0,8–0,9	0,1–0,2	0,93–1,14
Оз. Лісове	1,2–32,7	1,5–14,9	2,7–47,6
ВОЧАЕС	68–271	1,3–20	69–289
Оз. Глибоке	17–177	2,1–50	19–227
Янівський затон	7,5	1,2–3,2	8,7–10,7

Отже, дослідження особливостей формування потужності дози опромінення повітряно-водяних рослин у водоймах різної трофності та ступеня радіоактивного забруднення абіотичних компонентів показали, що зовнішнє опромінення рослин обумовлене випромінюванням радіонуклідів, зосереджених у донних відкладах. Зокрема, внесок величини потужності дози внутрішнього опромінення у загальну дозу опромінення рослин не перевищував 31 %. Тобто, величина дози опромінення повітряно-водяних рослин значною мірою залежить від вмісту радіонуклідів у донних відкладах водойм.

З огляду на зазначене вище, можна оцінити ризик радіаційного ураження повітряно-водяних рослин за вмістом радіонуклідів у донних відкладах водойм.

На сьогодні використовують визначення радіаційного ризику ураження гідробіонтів [16, 21], де ризики визначають як відношення дозового навантаження на організм у водоймі до референтного рівня:

$$R = D_{ex} / D_{ref} \text{ або } R = P_{ex} / P_{ref}$$

де P_{ex} , D_{ex} – потужність дози або доза опромінення організмів у водоймі;

P_{ref} , D_{ref} – референтна потужність дози або доза.

Референтний рівень дозового навантаження для гідробіонтів [16, 21] встановлений за аналізом баз даних біологічних ефектів, що виникли внаслідок дії іонізуючого випромінювання. В першому наближенні цей рівень є межею прояву радіаційних ефектів. До недоліків такого підходу можна віднести те, що таке визначення ризику припускає лінійну залежність між дозою та ефектом, однак у загальному випадку залежність доза-ефект нелінійна [7]. Крім того, морфометричні показники повітряно-водяних рослин прийняті такі самі як у занурених.

На нашу думку, найкраще враховує нелінійну залежність «доза – ефект» та значний

розмах значень величин дози для гідробіонтів у водоймах шкала, розроблена Г.Г. Полікарповим [25]. З урахуванням раніше наведених результатів, ризику радіаційного ураження повітряно-водяних рослин можливо визначити за рівнями радіоактивного забруднення донних відкладів, які утворюють відповідні дози опромінення цієї групи рослин.

Для розрахунку величини дози опромінення рослин розглянемо варіант безградієнтного вертикального розподілу радіонуклідів у донних відкладах, яке спостерігається у разі хронічного надходження радіонуклідів до водойм та на пізніх стадіях аварії.

Ризик радіаційного ураження повітряно-водяних рослин розрахований для найбільш вірогідного відносного розподілу маси окремих органів у пік вегетації, а саме коли на корені припадає 15 % загальної маси рослини, на кореневища – 35 %, на надземні органи – 50 %. Прийнято, що рослини розвиваються на глибині 50 см, висота рослин над рівнем води становить 2 м.

Рівні щільності радіонуклідного забруднення шару донних відкладів, які забезпечують неперевикнення максимальної потужності дози опромінення вегетуючих рослин для різних зон прояву радіобіологічних ефектів наведені у таблиці 7.

З урахуванням внутрішнього опромінення визначені межі вмісту радіонуклідів у донних відкладах, які відповідають різному ступеню прояву радіобіологічних ефектів у повітряно-водяних рослин (табл. 8). Під час розрахунків враховували максимальний зареєстрований у досліджених водоймах внесок внутрішнього опромінення у загальну дозу, який становив 31 %.

Враховуючи дані про рівні радіонуклідного забруднення водних екосистем України [5, 6, 11, 12, 26], гелофіти більшості водойм, зокрема Київського водосховища, розвиваються за умов зон радіаційного благополуччя та фізіологічного маскування, у деяких водоймах зони відчуження – за умов зони екологічного маскування.

Таблиця 7 – Рівні питомої активності радіонуклідів у донних відкладах для зон радіаційного впливу на повітряно-водяні рослини, які розраховані за критерієм потужності дози, кБк/кг природної вологості

Зона радіаційного впливу	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Можливої радіаційної недостатності	<0,025	<0,022
Радіаційного благополуччя	0,025–2,52	0,022–2,25
Фізіологічного маскування	2,52–25,2	2,25–22,5
Екологічного маскування	25,2–2520	22,5–2250
Ураження екосистем	>2520	>2250

Таблиця 8 – Рівні питомої активності радіонуклідів у донних відкладах для зон радіаційного впливу на повітряно-водні рослини з урахуванням внутрішнього опромінення, кБк/кг природної вологості

Зона радіаційного впливу	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Можливої радіаційної недостатності	<0,027	<0,024
Радіаційного благополуччя	0,027–2,68	0,024–2,4
Фізіологічного маскування	2,68–26,8	2,4–24
Екологічного маскування	26,8–2680	24–2400
Ураження екосистем	>2680	>2400

Висновки. На період досліджень величина потужності дози зовнішнього γ -опромінення підводних органів повітряно-водних рослин, що формується зосередженим у водних масах ¹³⁷Cs, у 100 та більше разів менша, ніж величина потужності дози від випромінювання ¹³⁷Cs, акумульованого у донних відкладах, тобто за визначення загальної дози нею можна знехтувати.

У досліджених водоймах зони відчуження потужність дози зовнішнього опромінення повітряно-водних рослин становила 7,5–271 мкГр/добу, за межами зони відчуження – 0,1–33 мкГр/добу.

Потужність дози внутрішнього опромінення повітряно-водних рослин водойм зони відчуження становила 1,2–50 мкГр/добу, за межами зони відчуження – 0,01–15 мкГр/добу.

Загальна потужність дози опромінення повітряно-водних рослин водойм зони відчуження становила 9–289 мкГр/добу, за межами зони відчуження – 0,65–48 мкГр/добу.

У водоймах поза межами зони відчуження внесок зовнішньої складової до загальної потужності дози становив від 69 до 81 %, у водоймах зони відчуження – від 69 до 78 %.

Визначені рівні вмісту радіонуклідів у донних відкладах, які відповідають різному ступеню прояву радіобіологічних ефектів у повітряно-водних рослин.

Повітряно-водні рослини більшості водойм, зокрема Київського водосховища, розвиваються за умов зон радіаційного благополуччя та фізіологічного маскування, у деяких водоймах зони відчуження – за умов зони екологічного маскування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 25 років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього: нац. доповідь України. Київ: КІМ, 2011. 356 с.
- Беляєв В.В., Волкова О.М., Гудков Д.І., Пришляк С.П. Реконструкція поглиненої дози іонізуючого випромінювання повітряно-водних рослин у водоймах ближньої зони аварії на Чорнобильській АЕС. Ядерна фізика та енергетика. 2020. Т. 21. № 4. С. 338–346. DOI: 10.15407/jnrae2020.04.338
- Волкова О.М., Беляєв В.В., Пришляк С.П., Пархоменко А.А. Оцінка потужності поглиненої дози опромінення ¹³⁷Cs повітряно-водними рослинами в оліготрофних та евтрофних водоймах. Гідробіологічний журнал. 2019. Т. 55. № 3. С. 105–112.
- Волкова О.М., Беляєв В.В., Пришляк С.П. Деякі аспекти формування поглиненої дози у повітряно-водних рослин. Гідробіол. журн. 2017. Т. 53. № 4. С. 76–84.
- Волкова О.М. Техногенні радіонукліди у гідробіонтах водойм різного типу: автореф. дис. ... д-ра біол. наук. Київ, 2008. 34 с.
- Техногенні радіонукліди у прісноводних екосистемах / М.І. Кузьменко та ін. Київ: Наук. думка, 2010. 262 с.
- Кутлахмедов Ю.О., Корогодін В.І., Кольтовер В.К. Основи радіоекології. Київ: Вища шк., 2003. 319 с.
- Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / за ред. В.Д. Романенка. Київ: ЛОГОС, 2006. 408 с.
- Пристер Б.С., Лоцилов Н.А., Немець О.Ф., Поярков В.А. Основи сільськогосподарської радіології. Київ: Урожай, 1991. 472 с.
- Поморцева Н.А., Родионова Н.К., Гудков Д.І., Кагрян О.Є. Кількісний та якісний клітинний склад периферичної крові риб у градієнті тривалого радіаційного опромінення. Гідробіологічний журнал. 2023. Т. 59. № 5. С. 93–111.
- Радіонукліди у водних екосистемах України / М.І. Кузьменко та ін. Київ: Чорнобильінтерінформ, 2001. 318 с.
- Абіотичні компоненти екосистеми Київського водосховища / В.М. Тімченко та ін. Київ: Логос, 2013. 60 с.

13. Шевцова Н.Л., Гудков Д.І., Беляев В.В., Пришляк С.П. Цитогенетичні порушення у гелофітів Чорнобильської зони відчуження. Актуальні питання радіобіології – 2023 / за ред. Н.К. Куцоконь, Н.М. Рашидова. Житомир: Радіобіологічне товариство України, 2023. 126 с.
14. Явнюк А.А., Шевцова Н.Л., Гудков Д.І. Аномалії насіння очерету у Чорнобильській зоні відчуження. Актуальні питання радіобіології – 2023 / за ред. Н.К. Куцоконь, Н.М. Рашидова. Житомир: Радіобіологічне товариство України, 2023. 36 с.
15. Radiation dose reconstruction for higher aquatic plants and fish in Glyboke Lake during the early phase of the Chernobyl accident / V.V. Belyaev et al. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023. Vol. 263. P. 107–169. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107169
16. The ERICA tool. *J. Environ / J.E. Brown et al. Radioact.* 2008. 99. P. 1371–1383.
17. Ganzha C.D., Gudkov D.I., Abramiuk I., Kaglyan O.E. Skeletal abnormalities in juvenile fish from the cooling pond of the Chernobyl nuclear power plant. *European Physical Journal: Special Topics*. 2023. Vol. 232. No 10. P. 1607–1615. DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-00895-5
18. The main radionuclides and dose formation in fish of the Chernobyl NPP exclusion zone / D.I. Gudkov et al. *Radiationnaia biologiya, radioecologia*. 2008. Vol. 48. No 1. P. 48–58.
19. Dynamics of the content and distribution of the main dose forming radionuclides in fishes of the exclusion zone of the Chernobyl NPS / D.I. Gudkov et al. *Hydrobiol. J.* 2008. Vol. 44. No 5. P. 87–104.
20. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone / D.I. Gudkov et al. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. 151. P. 438–448.
21. Handbook for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment. Deliverable 5: Appendix 1 Transfer Factor and Dose Conversion Coefficient Look-up Tables. 2003 / J. Brown, P. Strand, A. Hosseini, P. Børretzen (Eds.). Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT-2000-00102. Framework for Assessment of Environmental Impact. 395 p.
22. Fish of the Chernobyl exclusion zone: Modern levels of radionuclide contamination and radiation doses / A.Ye. Kaglyan et al. *Ibid.* 2019. Vol. 55. No 5. P. 86–104.
23. Changes in radiation exposure rate of fish of the cooling pond of the Chernobyl NPS and Lake Azbuchyn after water level lowering / O.Ye. Kaglyan et al. *Hydrobiol. J.* 2023. Vol. 59. No 2. P. 96–109. DOI: 10.1615/hydrobj.v59.i2.70
24. The number of aberrations in aberrant cells as a parameter of chromosomal instability / N.K. Kutsokov et al. *Characterization of dose dependency. Tsitol Genet.* 2003. 37(4). P. 20–25.
25. Polikarpov G.G. Conceptual model of organisms, populations and ecosystems to all possible dose rates of ionising radiation in the environment. *Radiation Protection Dosimetry*. 1998. Vol. 75. No 1–4. P. 181–185.
26. Regularities of ^{137}Cs Accumulation in the Above the Ground and Underground Phytomass of Helophytes *Hydrobiological Journal / S.P. Prishlyak et al.* 2015. Vol. 6. T. 51. P. 68–74. DOI: 10.1615/HydrobJ.v51.i6.80
27. Shevtsova N.L., Gudkov D.I. Cytogenetic effects of long-term radiation on higher aquatic plants within the Chernobyl accident Exclusion Zone. *Radioprotection*. 2009. 44. 5. P. 937–940.
28. Shevtsova N.L., Gudkov D.I. Cytogenetic damages in the common reed *Phragmites australis* in the water bodies of the Chernobyl exclusion zone. *Hydrobiological Journal*. 2013. 49. 2. P. 85–98.
29. Shevtsova N.L., Yavniuk A.A., Gudkov D.I. Effect of rest period on germination of the common reed seeds from the water bodies of the Chernobyl exclusion zone. *Hydrobiological Journal*. 2014. 50. 5. P. 78–88.
30. Volkova O.M., Belyaev V.V., Skyba V.V., Prishlyak S.P. Parameters of ^{137}Cs migration into the bottom sediments of various water bodies as a result of *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* dying away. *Hydrobiological journal*. 2023. 59 (3). DOI: 10.1615/HydrobJ.v59.i3.70

REFERENCES

- 25 років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього: нац. доповідь України [25 years of the Chernobyl disaster. Safety of the future: national report of Ukraine]. Kyiv, KIM, 2011, 356 p.
- Belyaev, V.V., Volkova, O.M., Gudkov, D.I., Prishlyak, S.P. (2020). Rekonstruktsiya pohlynenoji dozy ionizuyuchoho vprominyuvannya povitryano-vodnykh roslyn u vodoymakh blyzhozoy zony avariyi na Chornobyl's'kiy AES [Reconstruction of absorbed dose of ionizing radiation by air-water plants in water bodies of the near zone of the Chernobyl NPP accident]. *Yaderna Fizyka ta Energetyka [Nuclear physics and energy]*. Vol. 21, no. 4, pp. 338–346.
- Volkova, O.M., Beljaev, V.V., Prishlyak, S.P., Parkhomenko, A.A. (2019). Otsinka potuzhnosti pohlynenoji dozy oprominyennya ^{137}Cs povitryano-vodnykh roslynamy v oligotrofnnykh ta evtrofnnykh vodoymakh [Assessment of the absorbed dose power of irradiation ^{137}Cs by air-water plants in oligotrophic and eutrophic water bodies]. *Hidrobiolohichni Zhurnal [Hydrobiological journal]*. Vol. 55, no. 3, pp. 105–112.
- Volkova, O.M., Beljaev, V.V., Prishlyak, S.P. (2017). Deyaki aspekty formuvannya pohlynenoji dozy u povitryano-vodnykh roslyn [Some aspects of formation of the absorbed dose in air-water plants]. *Hidrobiolohichni Zhurnal [Hydrobiological journal]*. Vol. 53, no. 4, pp. 76–84.
- Volkova, O.M. (2008). Tekhnohenni radionuklidy u hidrobiontakh vodoym riznoho typu: avtoref. dys. ... d-ra biol. nauk [Man-made radionuclides in hydrobionts of water bodies of different types: author's abstract of doctoral thesis]. Kyiv, 34 p.
- Kuzmenko, M.I., Gudkov, D.I., Kireyev, S.I. (2010). Tekhnohenni radionuklidy u presnovodnykh ekosystemakh [Man-made radionuclides in freshwater ecosystems]. Kyiv, Scientific thought, 262 p.

7. Kutlakhmedov, Yu.O., Korohodin, V.I., Koltover, V.K. (2003). *Osnovy radioekologii* [Fundamentals of radioecology]. Kyiv, High school, 319 p.
8. Romanenko, V.D. (2006). *Metody hidroekologichnykh doslidzhen povitrovnykh vod* [Methods of hydroecological research of surface waters]. Kyiv, LOGOS, 408 p.
9. Pryster, B.S., Loshchylov, N.A., Nemets, O.F., Poyarkov, V.A. (1991). *Osnovy silskohospodarskoyi radiologii* [Basics of agricultural radiology]. Kyiv, Harvest, 472 p.
10. Pomortseva, N.A., Rodionova, N.K., Gudkov, D.I., Kaglyan, O.Ye. (2023). Kilkisnyy ta yakisnyy klitynnyy sklad periferichnoyi krovi ryb u hradienti tryvaloho radiatsiynoho oprominyennya [Quantitative and qualitative cellular composition of fish peripheral blood in the gradient of long-term radiation exposure]. *Hidrobiologichnyi Zhurnal* [Hydrobiological journal]. Vol. 59, no. 5, pp. 93–111.
11. Kuzmenko, M.I., Romanenko, V.D., Derevets, V.V. (2001). *Radionuklidy u vodnykh ekosystemakh Ukrainy* [Radionuclides in water ecosystems of Ukraine]. Kyiv, Chornobylinterinform, 318 p.
12. Timchenko, V.M., Linnik, P.M., Kholodko, O.P., Belyaev, V.V., Vanduk, N.S., Hulyaeva, O.O., Zhezherya, V.A. (2013). *Abiolychni komponenty ekosystemy Kyivskoho vodoskhovyshcha* [Abiotic components of the ecosystem of the Kyiv reservoir]. Kyiv, Logos, 60 p.
13. Shevtsova, N.L., Gudkov, D.I., Beljaev, V.V., Pryshlyak, S.P. (2023). *Tsytohenetychni porushennya u helofitiv Chornobyl'skoyi zony vidchuzhennya* [Cytogenetic disorders in helophytes of the Chernobyl exclusion zone]. *Aktualni pytannia radiobiologii – 2023* [Current issues of radiobiology – 2023]. Zhytomyr, Radiobiological Society of Ukraine, 126 p.
14. Yavnyuk, A.A., Shevtsova, N.L., Gudkov, D.I. (2023). *Anomalii nasinnia ocheretu u Chornobyl'skoyi zony vidchuzhennya* [Anomalies of reed seedlings in the Chernobyl exclusion zone]. *Aktualni pytannia radiobiologii – 2023* [Current issues of radiobiology – 2023]. Zhytomyr, Radiobiological Society of Ukraine, 36 p.
15. Belyaev, V.V., Volkova, O.M., Gudkov, D.I., Prishlyak, S.P., Skyba, V.V. (2023). Radiation dose reconstruction for higher aquatic plants and fish in Glyboke Lake during the early phase of the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. Vol. 263, 107169. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107169
16. Brown, J.E., Alfonso, B., Avila, R. (2008). The ERICA tool. *J. Environ. Radioact.* no. 99, pp. 1371–1383.
17. Ganzha, C.D., Gudkov, D.I., Abramiuk, I., Kaglyan, O.E. (2023). Skeletal abnormalities in juvenile fish from the cooling pond of the Chernobyl nuclear power plant. *European Physical Journal: Special Topics*. Vol. 232, no. 10, pp. 1607–1615. DOI: 10.1140/epjs/s11734-023-00895-5
18. Gudkov, D.I., Kaglyan, A.E., Kireev, S.I. (2008). The main radionuclides and dose formation in fish of the Chernobyl NPP exclusion zone. *Radiatsionnaia biologiya, radioecologiya*. Vol. 48, no. 1, pp. 48–58.
19. Gudkov, D.I., Kaglyan, A.Ye., Nazarov, A.B. (2008). Dynamics of the content and distribution of the main dose forming radionuclides in fishes of the exclusion zone of the Chernobyl NPS. *Hydrobiol. J.* Vol. 44, no. 5, pp. 87–104.
20. Gudkov, D.I., Shevtsova, N.L., Pomortseva, N.A. (2016). Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone. *Journal of Environmental Radioactivity*. no. 151, pp. 438–448.
21. Handbook for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment. Deliverable 5: Appendix 1 Transfer Factor and Dose Conversion Coefficient Look-up Tables. 2003. / J. Brown, P. Strand, A. Hosseini, P. Børretzen (Eds.). Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT-2000-00102. Framework for Assessment of Environmental Impact. 395 p.
22. Kaglyan, A.Ye., Gudkov, D.I., Kireyev, S.I. (2019). Fish of the Chernobyl exclusion zone: Modern levels of radionuclide contamination and radiation doses. *Ibid.* 2019. Vol. 55, no. 5, pp. 86–104.
23. Kaglyan, O.Ye., Gudkov, D.I., Belyaev, V.V. (2023). Changes in radiation exposure rate of fish of the cooling pond of the Chernobyl NPS and Lake Azbuchyn after water level lowering. *Hydrobiol. J.* Vol. 59, no. 2, pp. 96–109. DOI: 10.1615/hydrobj.v59.i2.70
24. Kutsokon', N.K., Bezrukov, V.F., Lazarenko, L.M. (2003). The number of aberrations in aberrant cells as a parameter of chromosomal instability. Characterization of dose dependency. *Tsitol Genet.* no. 37(4), pp. 20–25.
25. Polikarpov, G.G. (1998). Conceptual model of organisms, populations and ecosystems to all possible dose rates of ionising radiation in the environment. *Radiation Protection Dosimetry*. Vol. 75, no. 1–4, pp. 181–185.
26. Prishlyak, S.P., Belyaev, V.V., Volkova, Ye.N. (2015). Regularities of ¹³⁷Cs Accumulation in the Above the Ground and Underground Phytomass of Helophytes *Hydrobiological Journal*. Vol. 6, pp. 68–74. DOI: 10.1615/HydroJ.v51.i6.80
27. Shevtsova, N.L., Gudkov, D.I. (2009). Cytogenetic effects of long-term radiation on higher aquatic plants within the Chernobyl accident Exclusion Zone. *Radioprotection*. no. 44, pp. 937–940.
28. Shevtsova, N.L., Gudkov, D.I. (2013). Cytogenetic damages in the common reed *Phragmites australis* in the water bodies of the Chernobyl exclusion zone. *Hydrobiological Journal*. no. 49, pp. 85–98.
29. Shevtsova, N.L., Yavniuk, A.A., Gudkov, D.I. (2014). Effect of rest period on germination of the common reed seeds from the water bodies of the Chernobyl exclusion zone. *Hydrobiological Journal*. no. 50, pp. 78–88.
30. Volkova, O.M., Belyaev, V.V., Skyba, V.V., Pryshlyak, S.P. (2023). Parameters of ¹³⁷Cs migration into the bottom sediments of various water bodies as a result of *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* dying away. *Hydrobiological journal*. no. 59 (3). DOI: 10.1615/HydroJ.v59.i3.70

Assessment of the radiation exposure dose in air-water plants of various water body types in Polissia

Skyba V., Volkova O., Belyaev V., Pryshlyak S.

The study aimed to determine the exposure patterns in air-water plants of Polissia reservoirs located in the territories with different levels of radionuclide contamination of the catchment area, and to assess the risk of radiation damage to air-water plants based on the radionuclides content in the bottom sediments of the reservoirs.

To determine the regularities of the air-aquatic plant irradiation dose formation the results of the 2014–2020 research were used on the specific activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs in water, bottom sediments, and a set of data on the radionuclides content in aerial organs, rhizomes, and roots of *Phragmites australis* (Cav.) Trin as well as *Typha angustifolia* L. in the ecosystems of reservoirs outside the exclusion zone – Kyivskiyi (Strakholissia village) and Povchanskyi (Povch village, Korostensky district, Zhytomyr Region) reservoirs, Bile lake (Bile village, Varasky District, Rivne Oblast), and Lake Lisove (village of Nova Markovka, Vyshgorod district, Kyiv region); in the exclusion zone – Lake Glyboke, Yanivsky Zaton and the averaged samples from the two reservoirs formed in the course of draining of the Chernobyl Nuclear Power Plant cooling reservoir.

The specific activity of ^{90}Sr in the samples was determined by the oxalate method, and ^{137}Cs was determined by the gamma spectrometric method in the aquatic radioecology department of the Institute of Hydrobiology of the National Academy of Sciences of Ukraine. The heterogeneity of the plants environment, the attenuation of g-radiation by water masses and biomass, and the level of radionuclide contamination of

aboveground and underground organs were taken into account while determining plant radiation dose rates.

It was established that during the research period the dose rate of external g-irradiation of underwater organs of air-water plants that is formed by ^{137}Cs concentrated in water masses, is 100 or more times lower than that of ^{137}Cs radiation accumulated in bottom sediments, i.e. it can be neglected when determining the total dose.

In the studied reservoirs of the exclusion zone, the external irradiation dose rate in air-water plants was 7.5–271 $\mu\text{Gy}/\text{day}$, outside the exclusion zone it was 0.1–33 $\mu\text{Gy}/\text{day}$.

The dose rate of internal irradiation in the exclusion zone reservoirs air-water plants was 1.2–50 $\mu\text{Gy}/\text{day}$, outside the exclusion zone it was 0.01–15 $\mu\text{Gy}/\text{day}$.

The total radiation dose rate in the exclusion zone reservoirs air-water plants was 9–289 $\mu\text{Gy}/\text{day}$, in the reservoirs outside the exclusion zone it was 0.65–48 $\mu\text{Gy}/\text{day}$.

In the reservoirs outside the exclusion zone, the contribution of the external component to the total dose rate ranged from 69 to 81 %, in reservoirs within the exclusion zone it ranged from 69 to 78 %.

The study established the levels of radionuclide content in the bottom sediments corresponding to various degrees of radiobiological effects manifestation in air-water plants. It was established that the plants of most reservoirs, in particular the Kyiv Reservoir, develop in the conditions of radiation well-being zones of and physiological masking, in some reservoirs of the exclusion zone they develop under the conditions of ecological masking zones.

Key words: air-water plants, dose rate, bottom sediments, radionuclides.



Copyright: Скиба В.В. та ін. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Скиба В.В.

Волкова О.М.

Беляєв В.В.

Пришляк С.П.

<https://orcid.org/0000-0002-3605-1147>

<https://orcid.org/0000-0002-5868-4842>

<https://orcid.org/0000-0003-4465-7816>

<https://orcid.org/0000-0002-3838-3073>