ЕКОЛОГІЯ І МОНІТОРИНГ

УДК 630.1:582.572.232:546.36.027.137/.32.027.40:(477.42)
https://doi.org/10.33220/1026-3365.145.2024.65

ІНТЕНСИВНІСТЬ АКУМУЛЮВАННЯ ^{137}Cs ТА ^{40}К КОНВАЛІЄЮ ЗВИЧАЙНОЮ (*CONVALLARIA MAJALIS* L.) У ЖИТОМИРСЬКОМУ ПОЛІССІ

О. О. Орлов[1]*, О. В. Жуковський[2], Т. В. Курбет[3], В. В. Шевчук[4]

Розглянуто особливості акумулювання ^{137}Cs та ^{40}К фітомасою конвалії звичайної у Житомирському Поліссі. Виявлено, що питома активність ^{137}Cs у ґрунтах на постійних пробних площах була значно більшою, ніж ^{40}К. Зворотну закономірність визначено для фітомаси конвалії – на всіх постійних пробних площах середні значення питомої активності ^{40}К у фітомасі цього виду значно перевищували відповідний показник ^{137}Cs. Продемонстровано логнормальний розподіл значень коефіцієнта переходу (КП) як ^{137}Cs, так і ^{40}К у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» з ексцесом в області низьких значень. Виявлено зворотний лінійний зв'язок середньої тісноти (r = -0,56) питомої активності ^{137}Cs та ^{40}К у ґрунті з величиною КП ^{137}Cs. Його задовільно апроксимує лінійне рівняння y = 2,50 - 0,021x. Виявлено статистично достовірне зменшення інтенсивності акумуляції ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» у міру збільшення співвідношення ^{137}Cs/^{40}К у ґрунті, який є носієм радіоцезію.
К л ю ч о в і с л о в а : цезій-137, калій-40, питома активність, коефіцієнт переходу (КП), ґрунт, фітомаса.

Вступ. Після Чорнобильської катастрофи найбільшу увагу науковців було прикуто до ^{137}Cs, натомість інші радіонукліди донині вивчено значно гірше, а часто – лише фрагментарно. Одним із таких радіонуклідів є природний радіоізотоп ^{40}К, який вважають аналогом ^{137}Cs (Prister *et al*., 1991). Крім того, ^{40}К має константне співвідношення зі стабільним калієм (^{39}К+^{41}К) (Prister *et al*., 1991), що дає змогу використовувати ^{40}К для оцінювання забезпеченості ґрунтів валовим калієм. Загалом вважають, що в екосистемах калій конкурує з ^{137}Cs і є його антагоністом (Fredriksson, 1970), що зменшує акумуляцію ^{137}Cs рослинами з ґрунту за наявності значного вмісту валового калію.

Метою дослідження було кількісне оцінювання інтенсивності акумуляції ^{137}Cs та ^{40}К фітомасою конвалії звичайної (*Convallaria majalis* L.) з ґрунту.

Взаємовідносини ^{137}Cs та валового калію під час накопичення рослинами вивчають, починаючи із 70-х років XX століття (Fredriksson, 1970). Інтерес до цієї проблеми суттєво збільшився після Чорнобильської катастрофи, причому в різних природних екосистемах: болотних (Bunzl and Kracke, 1989; Vinichuk *et al*., 2010), лучних (Coughtrey *et al*., 1989; Heinrich and Remele, 1996; Bunzl *et al*., 2000) і лісових (Ronneau *et al*., 1991; Wyttenbach *et al*., 1995; Yoshida and Muramatsu, 1998).

Радіоактивне забруднення конвалії звичайної після Чорнобильської катастрофи привернуло увагу дослідників (Orlov and Mazepa, 1994; Krasnov *et al*., 2019a; 2019b).

[1] Орлов Олександр Олександрович, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», пр-т Академіка Палладіна, 34а, Київ, 02000, Україна; Поліський філіал УкрНДІЛГА ім. Г. М. Висоцького, вул. Нескорених, 2, Довжик, Житомирська обл., 10004, Україна. E-mail: orlov.botany@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2923-5324
[2] Жуковський Олег Валерійович, кандидат сільськогосподарських наук, Поліський філіал УкрНДІЛГА ім. Г. М. Висоцького, вул. Нескорених, 2, Довжик, Житомирська обл., 10004, Україна. E-mail: zh_oleh2183@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3351-9856
[3] Курбет Тетяна Володимирівна, кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, Житомир, 10005, Україна; Поліський філіал УкрНДІЛГА ім. Г. М. Висоцького, вул. Нескорених, 2, Довжик, Житомирська обл., 10004, Україна. E-mail: kpn_ktv@ztu.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7820-4263
[4] Шевчук Віктор Васильович, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Поліський філіал УкрНДІЛГА ім. Г. М. Висоцького, вул. Нескорених, 2, Довжик, Житомирська обл., 10004, Україна. E-mail: polysskiy_branch@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9121-9881
* Адреса для кореспонденції: orlov.botany@gmail.com

Продемонстровано, що в умовах свіжих і вологих сугрудів Українського Полісся вид є слабким накопичувачем ^{137}Cs, з коефіцієнтом переходу $1,0 < КП < 10,0$ $м^2 \cdot кг^{-1} \cdot 10^{-3}$.

Досліджено основні закономірності поглинання іонів $^{137}Cs^+$ та K^+ рослинами з ґрунту (Marscher, 1995) та шляхи їхнього надходження до рослинного організму (Gassmann and Schroeder, 1994; Zhu and Smolders, 2000; Ehlken and Kirchner, 2002). Показано, що K^+ надходить до кореневих волосків через іонні канали або в комплексі зі специфічними транспортерами іншим шляхом, тоді як $^{137}Cs^+$ – лише через іонні канали. Зроблено висновок, що за всієї подібності поведінки іонів $^{137}Cs^+$ та K^+ у системі «ґрунт – рослини» вони не є прямими аналогами (Smolders *et al*., 1996; del Carmen Ciuffo and Belli, 2006). Водночас виявлено наявність тісної додатної кореляції між концентраціями $^{137}Cs^+$ та K^+ у судинних рослин соснових лісів Японії (Yoshida and Muramatsu, 1998), зокрема показано подібність розподілу ^{137}Cs та валового калію у дереві сосни: максимальні концентрації виявлено у найбільш фізіологічно активних органах і тканинах – камбії, однорічній хвої, зовнішніх радіальних шарах деревини (Yoshida *et al*., 2011). Подібні дослідження, проведені в Європі, продемонстрували однакові тренди сезонної динаміки стабільних ^{133}Cs та ^{39}K+^{41}K у хвої ялини європейської (*Picea abies* (L.) H. Karst.) (Myttenaere *et al*., 1993). Це дало змогу зробити важливий методичний висновок про можливість використання даних стосовно поведінки стабільного калію для оцінювання поведінки ^{137}Cs у системі «ґрунт – рослини» у лісових біогеоценозах. Аналогічний висновок зроблено стосовно болотних екосистем Австрії (Bunzl and Kracke, 1989; Heinrich and Remele, 1996). Протилежний висновок щодо сезонної динаміки ^{137}Cs та валового калію на болотах Англії у пухівці піхвовій (*Eriophorum vaginatum* L.) зробили Jones *et al*. (1998). За їхніми даними, сезонна динаміка цих елементів значно різниться, що, з одного боку, свідчить про відмінності фізико-хімічних властивостей цих елементів, а з іншого – про різні шляхи їхньої транслокації в організмі рослини.

Лише поодинокі публікації присвячено взаємовідносинам ^{137}Cs та ^{40}K у системі «ґрунт – рослини». Зокрема, для альпійських луків Італії (del Carmen Ciuffo and Belli, 2006) зроблено висновок, що більші концентрації ^{40}K у ґрунті зумовлюють менше поглинання ^{137}Cs рослинами. Це добре узгоджується з раніше зробленим висновком про конкурентні відносини валового калію та ^{137}Cs у природних та антропогенних, зокрема сільськогосподарських, екосистемах (Prister *et al*., 1991; Yoshida and Muramatsu, 1999) та важливість внесення калійних добрив для реабілітації сільськогосподарських угідь.

Матеріали й методи. Дослідження проведено в травні 2023 р. на постійних пробних площах (ППП), закладених у 1991 р. у Лугинському (ППП № 1 і 2) та Красноставському (ППП № 5 і 6) лісництвах філії «Лугинське лісове господарство» ДП «Ліси України». Таксаційні показники насаджень наведено станом на 2018 р. (табл. 1).

На всіх пробних площах рослинний покрив був подібним. Підріст – дуб звичайний (*Quercus robur* L.) віком 8–15 років, 2,2–3,5 м заввишки. Підлісок – розріджений, рівномірний, із зімкненістю 0,1–0,3, з крушини ламкої (*Frangula alnus* Mill.) та горобини звичайної (*Sorbus aucuparia* L.). Трав'яно-чагарничковий ярус густий, рівномірний, з проєктивним покриттям 70–80 % та домінуванням конвалії звичайної (*Convallaria majalis* L.) (50–55 %). Постійними видами були: орляк звичайний (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.) (5–15 %), купина запашна (*Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce) (3–5 (10) %), суниці лісові (*Fragaria vesca* L.) (1–3 %), серпій фарбувальний (*Serratula tinctoria* L.) (1–3 %), перлівка поникла (*Melica nutans* L.) (3–5 %), дзвоники персиколисті (*Campanula persicifolia* L.) (до 1 %), конюшина альпійська (*Trifolium alpestre* L.) (1–5 %), смовдь оленяча (*Peucedanum cervaria* (L.) Lapeyr.) (3–5 %), вероніка дібровна (*Veronica chamaedrys* L.) та інші. Флористична насиченість ценозу становила 50–65 видів на 625 $м^2$.

Представлена флористична асоціація *Serratulo-Pinetum* (*sylvestris*) (Matuszkiewich 1981) J. Matuszkiewich 1988, союзу *Pino-Quercion* Medwecka-Kornaś et al. in Szafer 1959, порядку *Quercetalia roboris* Tx. 1931, класу *Quercetea robori-petraeae* Br.-Bl. ex Tx. ex Oberd. 1957.

Таблиця 1

Таксаційна характеристика деревостанів на пробних площах у філії «Лугинське лісове господарство» ДП «Ліси України», станом на 2018 р.

Table 1

Mensuration characteristics of permanent experimental plots (PEP) in the Branch "Luhyny Forestry" of the State Specialized Forest Enterprise "Forests of Ukraine", as of 2018

№ ППП No. PEP	Місцезнаходження Location	Вік, років Age, years	Склад деревостану Composition of the stand	Відносна повнота Relative density of stocking	Клас бонітету Stand quality class
1	Лугинське л-во, квартал 86, виділ 14 Luhyny forestry, compartment 86, subcompartment 14	74	5Ос2Дз2Бп1Сз Aspen 50%, oak 20%, birch 20%, pine 10%	0,6	II
2	Лугинське л-во, квартал 86, виділ 11 Luhyny forestry, compartment 86, subcompartment 11	74	4Дз3Сз2Бп1Ос Oak 40%, pine 30%, birch 20%, aspen 10%	0,7	I
5	Красноставське л-во, квартал 14, виділ 1 Krasnostav forestry, compartment 14, subcompartment 1	78	6Дз2Бп2Сз Oak 60%, birch 20%, pine 20%	0,7	I
6	Красноставське л-во, квартал 14, виділ 2 Krasnostav forestry, compartment 14, subcompartment 2	73	6Сз3Бп1Дз Pine 60%, birch 30%, oak 10%	0,7	I

Ґрунт – багаті відміни дерново-слабопідзолистих супіщаних або глинисто-піщаних ґрунтів на водно-льодовикових відкладах. Лісова підстилка (H_0) потужністю 3–5 см складалася переважно з хвойного опаду та решток листя дерев, трав і чагарничків. Гумусово-елювіальний горизонт (НЕ) потужністю 15–20 см, темно-сірий, супіщаний, свіжий, густо пронизаний корінням сосни, коренями трав і чагарничків. Елювіальний горизонт (Е) виражений фрагментарно. Щільно коренезаселений шар ґрунту мав товщину 30 см.

На кожній пробній площі за допомогою сітки Л. Г. Раменського закладали 6 облікових ділянок площею 1 м^2, з яких зрізали надземну фітомасу конвалії, а також відбирали комплементарні до неї зразки ґрунту (циліндричним буром діаметром 5 см, на глибину 10 см). Ці зразки ґрунту було об'єднано по 5 шт. у збірні зразки, які характеризували ділянки площею 1 м^2 та в яких надалі проводили всі вимірювання.

Показником інтенсивності акумуляції ^{137}Cs надземною фітомасою рослин із ґрунту слугував коефіцієнт переходу (КП), який розраховували як відношення питомої активності певного радіонукліда у фітомасі (Am, Бк·кг$^{-1}$) до щільності забруднення ґрунту цим радіонуклідом (As, кБк·м$^{-2}$), тому КП мав розмірність – м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} (Belli and Tikhomirov, 1996).

Усі зразки висушували в сушильних шафах до повітряно-сухого стану: фітомасу – за температури 70 ºС протягом 72 год.; ґрунт – за 80ºС протягом 96 год. та механічно гомогенізували на пробопідготовлювачах ПРП та ПРГ, уміщували в посудини Марінеллі об'ємом 1 000 см^3 та 500 см^3 та зважували. Питому активність ^{137}Cs та ^{40}K у зразках вимірювали на багатоканальному спектроаналізаторі СЕГ-001 «АКП-С» із сцинтиляційними детекторами БДЕГ-20Р2. Відносна похибка вимірювання цього показника стосовно обох радіонуклідів не перевищувала 15 %.

Українські назви рослин подано за Ю. Кобівим (Kobiv, 2004), латинські – за базою Plants of the World Online (POWO, 2024). Тип лісорослинних умов визначали за П. С. Погребняком (Pogrebnyak, 1955). Статистичний аналіз отриманих результатів здійснювали із застосуванням пакета MS Excel загальноприйнятими методами варіаційної статистики (Lakin, 1973).

Результати. Нами отримано значення питомої активності ^{137}Cs та ^{40}K у ґрунтах пробних площ, визначено щільність забруднення ґрунту цими радіонуклідами та обраховано середні значення (табл. 2).

Таблиця 2

Радіоекологічні параметри ^{137}Cs та ^{40}K у ґрунтах постійних пробних площ

Table 2

Radioecological parameters of ^{137}Cs and ^{40}K in the soils of permanent experimental plots (PEP)

№ ППП No. PEP	Статистичні показники Statistical indicators	^{137}Cs		^{40}K	
		Am у ґрунті, Бк·кг$^{-1}$ Am in the soil, Bq·kg^{-1}	As ґрунту, кБк·м$^{-2}$ As of the soil, kBq·m^{-2}	Am у ґрунті, Бк·кг$^{-1}$ Am in the soil, Bq·kg^{-1}	As ґрунту, кБк·м$^{-2}$ As of the soil, kBq·m^{-2}
1	*M*	4 109	345,1	69,0	6,0
	±*m*	612,3	45,35	6,1	0,74
	±Std	1 499,72	111,09	14,94	1,82
	V, %	36,50	32,19	21,81	30,35
	p, %	14,90	13,14	8,90	12,39
2	*M*	3 752	326,2	81	7,0
	±*m*	255,6	21,34	4,69	0,42
	±Std	626,00	52,26	11,48	1,03
	V, %	16,68	16,02	14,24	14,63
	p, %	6,81	6,54	5,81	5,97
5	*M*	576	46,0	108,5	8,8
	±*m*	50,5	2,87	8,7	0,9
	±Std	123,78	7,03	21,36	2,22
	V, %	21,48	15,29	19,69	25,14
	p, %	8,77	6,24	8,04	10,26
6	*M*	778	61,5	118,0	9,5
	±*m*	79,5	5,30	7,46	0,84
	±Std	210,34	14,01	19,75	2,23
	V, %	27,03	22,78	16,74	23,37
	p, %	10,22	8,61	6,33	8,83

Примітки:

1. Статистичні показники: *M* – середнє арифметичне значення; *m* – похибка середнього арифметичного значення; Std – середнє квадратичне відхилення; *V* – коефіцієнт варіювання; *p* – відносна похибка середнього значення.

2. Am – питома активність радіонукліда у фітомасі, Бк·кг$^{-1}$; As – щільність забруднення ґрунту радіонуклідом, кБк·м$^{-2}$.

Notes:

1. Statistical indicators: *M* – arithmetic mean; *m* – error of arithmetic mean; Std – standard deviation; *V* – coefficient of variation; *p* – relative error of arithmetic mean.

2. Am – activity concentration of radionuclide in phytomass, Bq·kg^{-1}; As – density of soil contamination by radionuclide, kBq·m^{-2}.

Експериментальне визначення питомої активності ^{137}Cs у надземній фітомасі конвалії звичайної та щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs та ^{40}K дало змогу розрахувати середні значення КП для кожного з цих радіонуклідів та відповідні статистичні показники (табл. 3).

Таблиця 3

Середні значення питомої активності ^{137}Cs та ^{40}K у зразках, щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs та ^{40}K та середні значення КП обох радіонуклідів у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії»

Table 3

The average values of activity concentration of ^{137}Cs and ^{40}K in the samples, density of soil contamination by ^{137}Cs and ^{40}K and the average values of transfer factor (TF) of both radionuclides in the chain «soil – lily-of-the-valley phytomass»

№ ППП No. PEP	Статистичні показники Statistical indicators	^{137}Cs			^{40}K		
		Am у фітомасі, Бк·кг$^{-1}$ Am in phytomass, Bq·kg^{-1}	As ґрунту, кБк·м$^{-2}$ As of the soil, kBq·m^{-2}	КП, м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} TF, m^2·kg^{-1}·10^{-3}	Am у фітомасі, Бк·кг$^{-1}$ Am in phytomass, Bq·kg^{-1}	As ґрунту, кБк·м$^{-2}$ As in the soil, kBq·m^{-2}	КП, м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} TF, m^2·kg^{-1}·10^{-3}
1	*M*	421	345,1	1,3	667	6,0	119,1
	±*m*	31,5	45,35	0,15	45,9	0,74	14,04
	±Std	77,18	111,09	0,38	112,54	1,82	34,39
	V, %	18,32	32,19	28,89	16,87	30,35	28,88
	p, %	7,48	13,14	11,80	6,89	12,39	11,79
2	*M*	398	326,2	1,2	693	7,0	103,0
	±*m*	52,35	21,34	0,16	48,3	0,42	15,13
	±Std	128,22	52,26	0,39	118,31	1,03	37,05
	V, %	32,20	16,02	31,43	17,08	14,63	35,96
	p, %	13,15	6,54	12,83	6,97	5,97	14,68
5	*M*	136	46,0	3,0	820	8,8	98,7
	±*m*	14,3	2,87	0,35	33,06	0,91	12,57
	±Std	35,05	7,03	0,86	80,98	2,22	30,78
	V, %	25,80	15,29	28,49	9,88	25,14	31,19
	p, %	10,53	6,24	11,63	4,03	10,26	12,73
6	*M*	112	61,5	2,0	932	9,5	104,5
	± *m*	20,2	5,30	0,48	44,8	0,84	13,34
	±Std	53,35	14,01	1,28	118,58	2,23	35,29
	V, %	47,69	22,78	65,21	12,72	23,37	33,78
	p, %	18,03	8,61	24,65	4,81	8,83	12,77

Примітки:

1. Статистичні показники: *M* – середнє арифметичне значення; *m* – похибка середнього арифметичного значення; Std – середнє квадратичне відхилення; *V* – коефіцієнт варіювання; *p* – відносна похибка середнього значення.

2. Am – питома активність радіонукліда у фітомасі, Бк·кг$^{-1}$; As – щільність забруднення ґрунту радіонуклідом, кБк·м$^{-2}$; КП – коефіцієнт переходу радіонукліда з ґрунту до фітомаси конвалії, м^2·кг$^{-1}$·10^{-3};

Notes:

1. Statistical indicators: *M* – arithmetic mean; *m* – error of arithmetic mean; Std – standard deviation; *V* – coefficient of variation; *p* – relative error of arithmetic mean.

2. Am – activity concentration of radionuclide in phytomass, Bq·kg^{-1}; As – density of soil contamination by radionuclide, kBq·m^{-2}; TF – soil-to-plant transfer factor, m^2·kg^{-1}·10^{-3}.

Узагальнені дані щодо середніх значень КП ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» наведено на рисунку 1, а для ^{40}K – на рисунку 2.

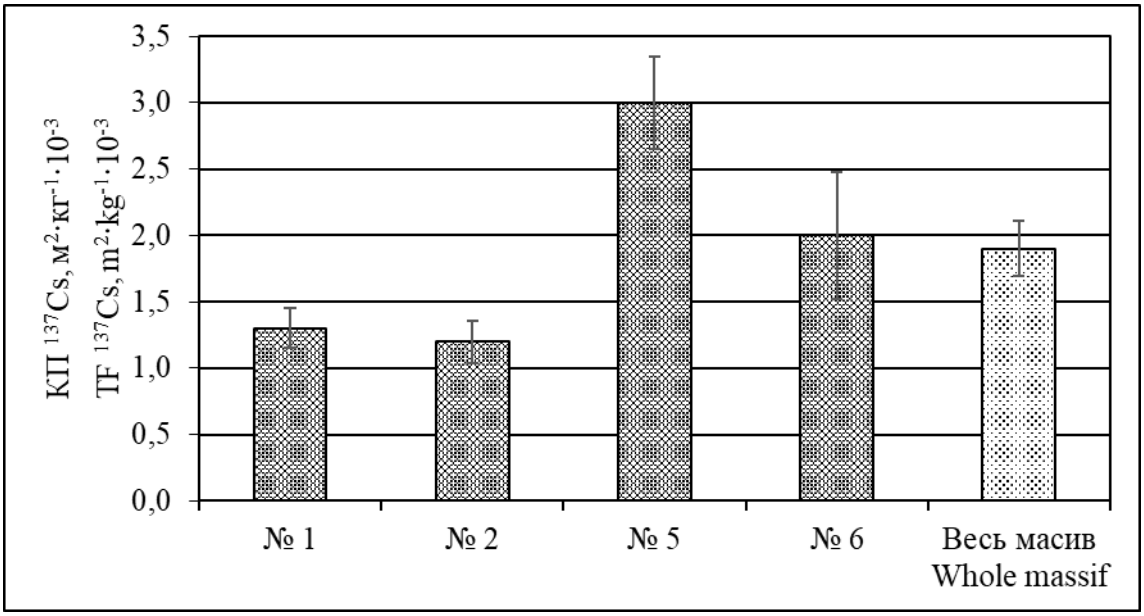

Рис. 1 – Середні значення КП ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» на постійних пробних площах
Fig. 1 – The average values of TF for ^{137}Cs in the chain "soil – lily-of-the-valley phytomass" on permanent experimental plots

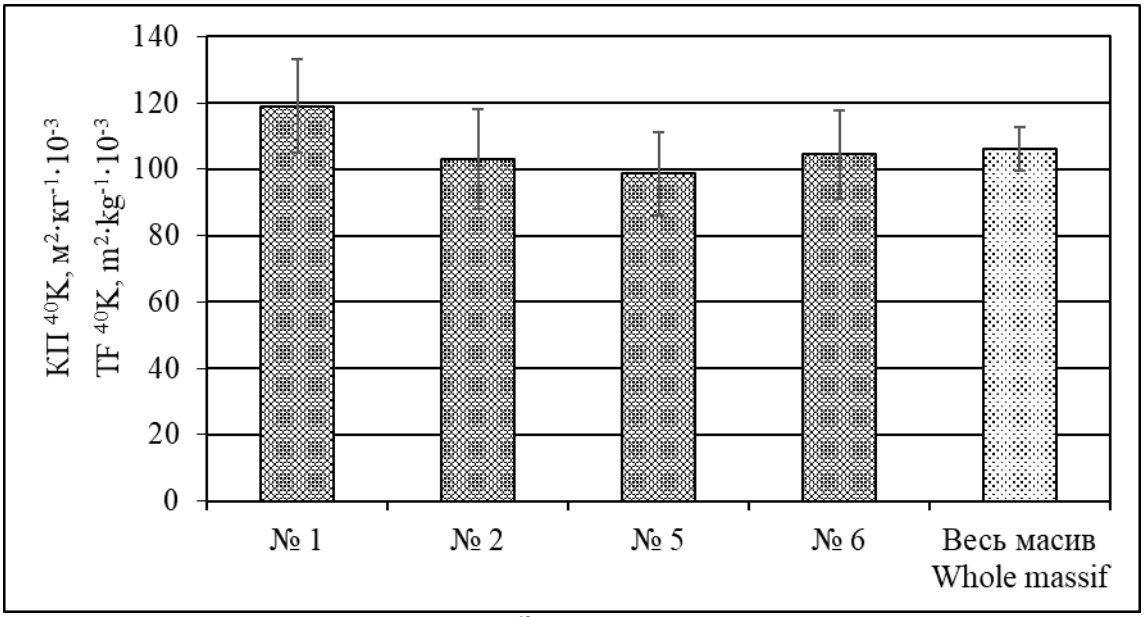

Рис. 2 – Середні значення КП ^{40}K у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» на постійних пробних площах
Fig. 2 – The average values of TF for ^{40}K in the chain "soil – lily-of-the-valley phytomass" on permanent experimental plots

Значний науковий інтерес становить аналіз статистичного розподілу фактичних значень КП ^{137}Cs (рис. 3) та ^{40}K (рис. 4) у всьому масиві даних.

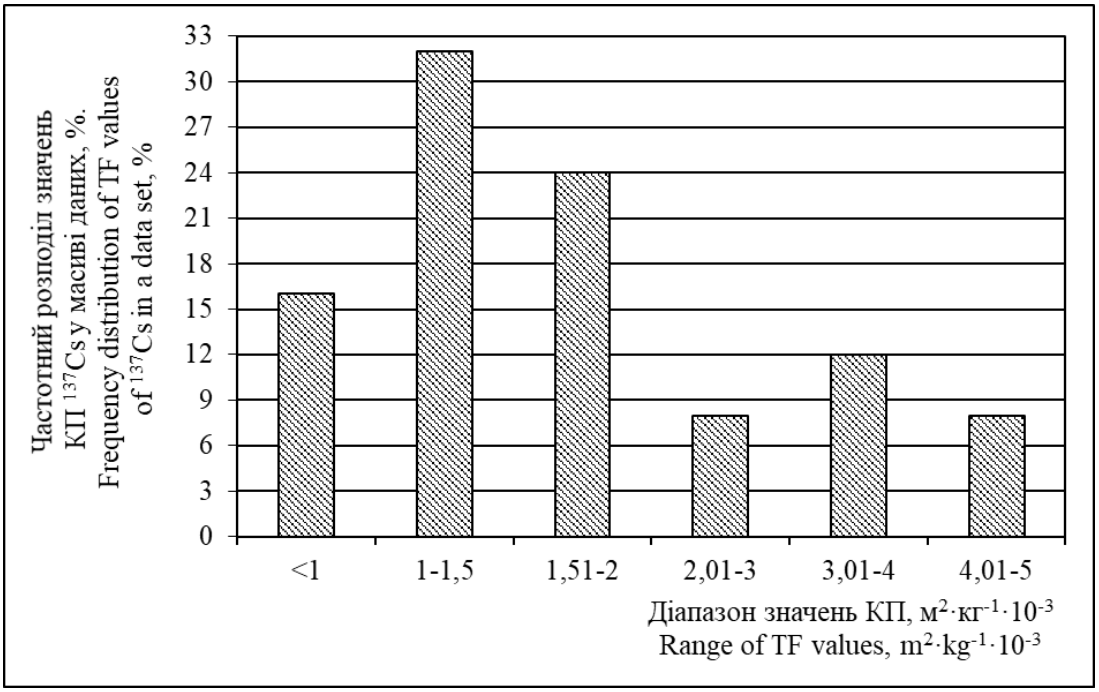

Рис. 3 – Частотний розподіл значень КП ^{137}Cs у масиві даних
Fig. 3 – Frequency distribution of TF values for ^{137}Cs in the data set

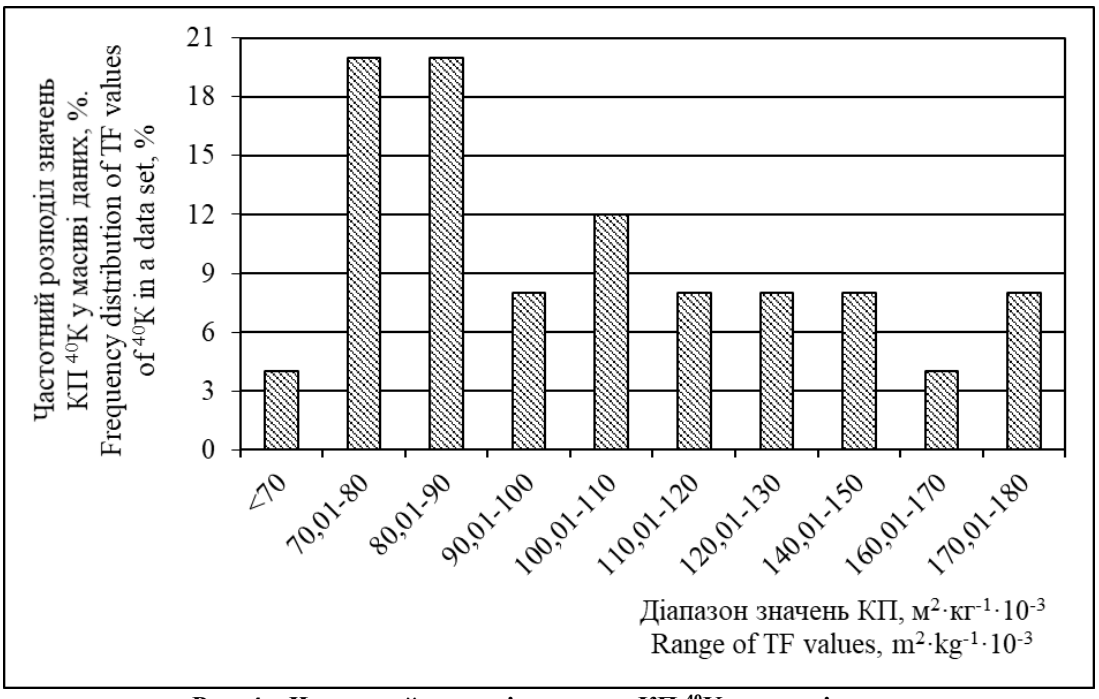

Рис. 4 – Частотний розподіл значень КП ^{40}K у масиві даних
Fig. 3 – Frequency distribution of TF values for ^{40}K in the data set

Для виявлення конкурентних взаємовідносин між ^{137}Cs та ^{40}K у системі «ґрунт – рослина» нами використано специфічний підхід – розрахунок кореляції співвідношення вмісту ^{137}Cs та ^{40}K у ґрунті зі значенням КП ^{137}Cs у конвалії звичайної (рис. 5).

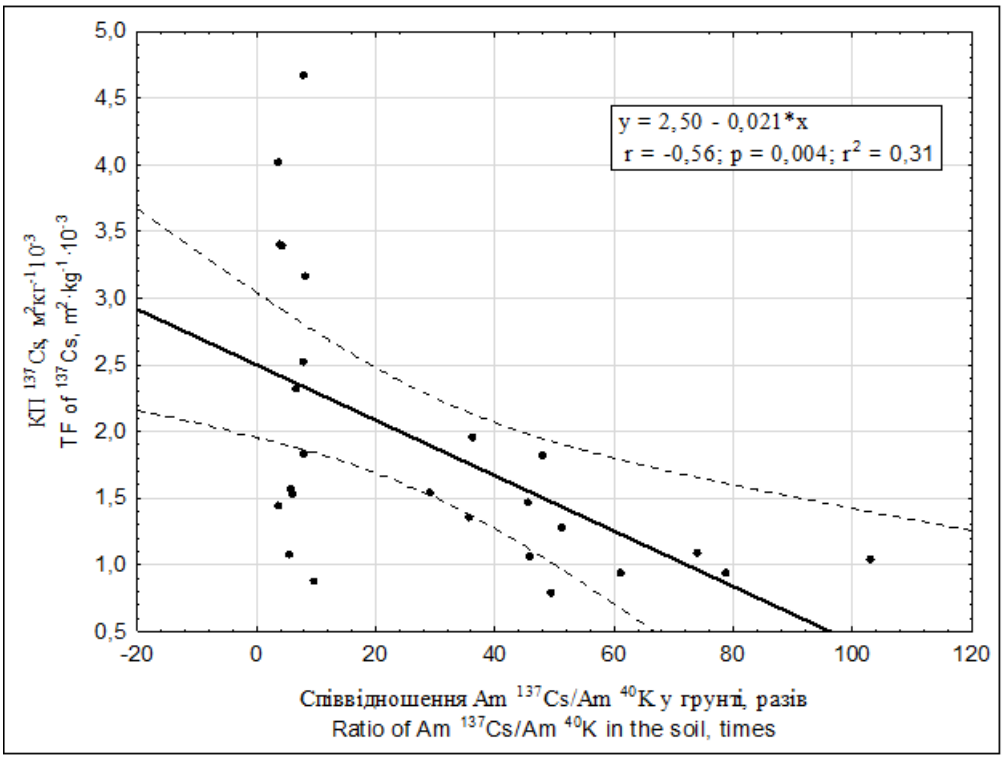

Рис. 5 – Кореляція співвідношення вмісту ^{137}Cs та ^{40}K у ґрунті з величиною КП ^{137}Cs у конвалії звичайної
Fig. 5 – Correlation of ratio of ^{137}Cs and ^{40}K content in the soil with values of TF ^{137}Cs in lily-of-the-valley

Обговорення. Дані таблиці 2 свідчать, що в масиві даних пробних площ питома активність ^{137}Cs у ґрунті варіювала в широкому діапазоні – від 4 109,0 ± 612,3 Бк·кг$^{-1}$ на ППП № 1 до 576,0 ± 50,5 Бк·кг$^{-1}$ на ППП № 5, різниця становила 7,13 разу. Розрахунки показали, що питома активність ^{40}K у ґрунті варіювала у значно вужчому діапазоні – від 69,0 ± 6,1 Бк·кг$^{-1}$ на ППП № 1 до 118,0 ± 7,5 Бк·кг$^{-1}$ на ППП № 6, різниця становила 1,71 разу. Середні значення щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs варіювали від 345,10 ± 45,35 кБк·м$^{-2}$ на ППП № 1 до 46,00 ± 2,87 кБк·м$^{-2}$ на ППП № 5. Аналогічний показник ^{40}K становив від 6,00 ± 0,74 кБк·м$^{-2}$ на ППП № 1 до 9,50 ± 0,84 кБк·м$^{-2}$ на ППП № 6.

Аналіз даних таблиці 3 демонструє, що вміст ^{137}Cs у фітомасі конвалії звичайної знаходився в діапазоні від 112,0 ± 20,2 Бк·кг$^{-1}$ на ППП № 6 (As = 61,50 ± 5,30 кБк·м$^{-2}$) до 4 212,0 ± 31,5 Бк·кг$^{-1}$ на ППП № 1 (As = 345,10 ± 45,35 кБк·м$^{-2}$). Велике варіювання значень КП ^{137}Cs у фітомасі конвалії (20–25 %) на всіх пробних площах ми відзначали і раніше (Orlov and Mazepa, 1994; Krasnov *et al*., 2019b). Діапазон питомої активності ^{40}K у фітомасі конвалії звичайної був вужчим – від 667,0 ± 45,9 Бк·кг$^{-1}$ на ППП № 1 (As = 6,00 ± 0,74 кБк·м$^{-2}$) до 932,0 ± 44,8 Бк·кг$^{-1}$ на ППП № 6 (As = 9,50 ± 0,84 кБк·м$^{-2}$). Дані таблиці 3 дають можливість зробити загальний висновок, що на всіх пробних площах середні значення питомої активності ^{40}K у фітомасі конвалії звичайної значно перевищували відповідний показник ^{137}Cs.

Порівняльний аналіз середніх значень КП ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» на пробних площах (рис. 1) демонструє, що вони були незначними – від 1,20 ± 0,16 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} на ППП № 2 до 3,00 ± 0,35 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} на ППП № 5. Середнє значення КП ^{137}Cs у всьому масиві даних дорівнювало 1,90 ± 0,41 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3}. Наведені результати добре корелюють з раніше отриманими нами даними (2018 р.) на цих самих пробних площах (Krasnov *et al*., 2019a; 2019b). Зокрема, у 2018 р. значення КП ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» були мінімальними на ППП № 1 та ППП № 2 – 2,00 ± 0,14 та 1,90 ± 0,05 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} відповідно. Приблизно вдвічі більшими були значення згаданого показника на ППП № 5 та ППП № 6 – 4,70 ± 0,75 та 4,00 ± 0,56 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} відповідно. Відзначимо також, що від початку досліджень (1991 р.) значення КП ^{137}Cs у цього виду зменшилися більш ніж у 10 разів і продовжують повільно зменшуватися (Krasnov *et al*., 2019a).

Так, наприклад, у 1992 р. середнє значення КП ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» за даними всіх пробних площ дорівнювало 11,40 ± 2,04 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} (Orlov and Mazepa, 1994).

КП ^{40}K у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» на пробних площах (рис. 2) були значно вищими, ніж аналогічні показники ^{137}Cs, і становили від 98,70 ± 12,57 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} на ППП № 5 до 119,10 ± 14,04 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} на ППП № 1 за середнього значення у всьому масиві даних 106,30 ±4,43 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3}. З даних рисунку 3 випливає, що розподіл значень КП ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» є логнормальним з ексцесом в області низьких значень. Найвищу частоту трапляння мають значення КП ^{137}Cs у діапазоні 1,0–1,5 (32,0 %) та 1,51–2,00 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} (24,0 %). Мінімальною частотою трапляння характеризуються значення КП у діапазоні 4,01–5,0 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} (8,0 %).

Аналіз даних рисунку 4, подібно до рисунку 3, також демонструє, що розподіл значень КП ^{40}K у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» є логнормальним з ексцесом в області низьких значень. Максимальну частоту трапляння значень КП ^{40}K виявлено в масиві даних у діапазонах 70,01–80,00 та 80,01–90,00 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} (по 20,0 %), а мінімальну – у діапазоні 160,01–170,00 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} (4,0 %). Наведені дані свідчать про необхідність відбору та аналізу статистично достовірних кількостей зразків як по ^{137}Cs, так і ^{40}K.

Взаємовідносини між ^{137}Cs та ^{40}K у системі «ґрунт – рослина» нами показані на рисунку 5 з використанням нового підходу – аналізу співвідношення питомих активностей ^{137}Cs та ^{40}K у ґрунті як конкурентних радіонуклідів із значенням КП ^{137}Cs у конвалії звичайної.

Одержані дані свідчать про зменшення інтенсивності акумулювання ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» у разі збільшення співвідношення ^{137}Cs/^{40}K у ґрунті. Значущу залежність (r = -0,56; p = 0,004) КП ^{137}Cs у системі «ґрунт – конвалія» (y) від співвідношення ^{137}Cs та ^{40}K у ґрунті (x) апроксимує лінійне рівняння: $y = 2{,}50 - 0{,}021x$.

Висновки. Питома активність ^{40}K у ґрунті пробних площ є значно меншою, порівнюючи із ^{137}Cs. Натомість у фітомасі конвалії звичайної питома активність ^{40}K значно більша, ніж ^{137}Cs. Середні значення КП ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» є суттєво меншими за аналогічний показник ^{40}K – 1,9 ± 0,41 проти 106,3 ± 4,43 м^2·кг$^{-1}$·10^{-3} відповідно. Розподіл значень КП як ^{137}Cs, так і ^{40}K у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» є логнормальним з ексцесом в області низьких значень. Виявлено лінійний зворотний достовірний (p = 0,004) зв'язок середньої тісноти (r = -0,56) інтенсивністю акумулювання ^{137}Cs та співвідношенням ^{137}Cs/^{40}K у ґрунті, який задовільно апроксимує лінійне рівняння. Виявлено статистично достовірне зменшення інтенсивності акумуляції ^{137}Cs у ланці «ґрунт – фітомаса конвалії» зі збільшенням співвідношення ^{137}Cs/^{40}K у ґрунті, який є носієм радіоцезію. Отриманий результат демонструє, що взаємодія іонів ^{137}Cs$^+$ та ^{40}K$^+$ у ґрунті є значно складнішою, ніж просто конкуренція.

Подяки. Автори щиро вдячні за допомогу у наданні інформації та проведенні науково-дослідних робіт спеціалістам філії «Лугинське лісове господарство» ДП «Ліси України» – начальнику відділу лісового господарства Сергію Жубинському, головному лісничому Андрію Шевчуку й директору Валентину Угнівому та співробітникам Поліського філіалу УкрНДІЛГА – Неонілі Мороз та Олександру Дмитренку.

Джерела фінансування. Статтю підготовлено авторами у межах виконання теми Поліського філіалу УкрНДІЛГА, замовником якої було Державне агентство лісових ресурсів України (№ держреєстрації 0120U101898).

ПОСИЛАННЯ – REFERENCES

Belli, M. and Tikhomirov, F. (eds.) (1996) *Behaviour of radionuclides in natural and semi-natural environments: Experimental Collaboration Project No. 5, Final Report*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

Bunzl, K. and Kracke, W. (1989) 'Seasonal variation of soil-to-plant transfer of K and fallout $^{134,\ 137}$Cs in peatland vegetation', *Health Physics*, 57(4), pp. 593–600. https://doi.org/10.1097/00004032-198910000-00011

Bunzl, K., Alberts, B., Schimmack, W., Belli, M., Ciuffo, L. and Menegon, S. (2000) 'Examination of a relationship between ^{137}Cs concentration in soils and plant from alpine pastures', *Journal of Environment Radioactivity*, 48(2), pp. 145–158. https://doi.org/10.1016/S0265-931X(99)00061-2

Coughtrey, P. J., Kirton, J. A. Mitchell, N. G. and Morris, C. (1989) 'Transfer of radioactive cesium from soil to vegetation and comparison with potassium in upland grasslands', *Environmental Pollution*, 62, pp. 281–315. https://doi.org/10.1016/0269-7491(89)90150-4

del Carmen Ciuffo, L. E. and Belli, M. (2006) 'Radioactive trace in semi natural grassland. Effect of ^{40}K in soil and potential remediation', *Electronic Journal of Biotechnology*, 9(3), pp. 297–302. http://dx.doi.org/10.2225/vol9-issue3-fulltext-5

Ehlken, S. and Kirchner, G. (2002) 'Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data: a review', *Journal of Environmental Radioactivity*, 58, pp. 97–112. https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00060-1

Fredriksson, L. (1970) 'Plant uptake of fission products. III. Uptake of ^{137}Cs by *Trifolium pratense* as influenced by the potassium and calcium level in the soil', *Lantbrukshogsk. Ann*, 36, pp. 34–50.

Gassmann, W. and Schroeder, J. I. (1994) 'Inward-rectifying K^+ channels in root hairs of wheat (A mechanism for aluminum-sensitive low-affinity K^+ uptake and membrane potential control)', *Plant Physiology*, 105(4), pp. 1399–1408. https://doi.org/10.1104/pp.105.4.1399

Heinrich, G. and Remele, K. (1996) '^{137}Cs, ^{90}Sr, K^+ and Ca^{++} in lichens, mosses and vascular plants of mountain area in Styria, Austria', in *Ten years terrestrial radioecological research following the Chernobyl accident. Intern. Symposium on Radioecology 1996*. Austria: Berger, pp. 243–250.

Jones, D. R., Eason, W. R. and Dighton, J. (1998) 'The partitioning of ^{137}Cs, in comparison to K, P, and Ca in the shoots of *Eriophorum vaginatum* L. plants', *Environmental Pollution*, 101(3), pp. 437–439. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00170-X

Kobiv, Yu. V. (2004) *Dictionary of Ukrainian scientific and vernacular names for vascular plants*. Kyiv: Naukova Dumka. ISBN 966-00-0355-2 (in Ukrainian).

Krasnov, V. P., Melnik, V. V., Kurbet, T. V., Zhukovsky, O. V., Zborovska, O. V. and Orlov, O. O. (2019a) 'Dynamics of ^{137}Cs activity concentration in *Convalaria majalis* L. in Polissia forests of Ukraine after the accident at Chornobyl Nuclear Power Plant, *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 20(3), pp. 278–284 (in Ukrainian). https://doi.org/10.15407/jnpae2019.03.278

Krasnov, V. P., Orlov, O. O., Zhukovsky, O. V., Zborovska, O. V., Kurbet, T. V., Melnyk, V. V. and Shelest, Z. M. (2019b) 'Radioactive contamination of lily-of-the valley (*Convallaria majalis* L.) in Zhytomyr Polissia forests', *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(9), pp. 60–64 (in Ukrainian). https://doi.org/10.36930/40290910

Lakin, G. F. (1973) *Biometrics*. Moscow: Vysshaya Shkola (in Russian).

Marscher, H. (1995) *Mineral Nutrition of Higher Plants. Second edition*. London: Academic Press. ISBN 0-12-4 73542-8.

Myttenaere, C., Schell, W. R., Thiry, Y., Sombre, L., Ronneau, C. and van der Stegen de Schrieck, J. (1993) 'Modelling of Cs-137 cycling in forests: recent developments and research needed', *Science of the Total Environment*, 136, pp. 77–91. https://doi.org/10.1016/0048-9697(93)90298-K

Orlov, O. O. and Mazepa, M. G. (1994) 'Radioactive cesium-137 contamination of lily-of-the-valley in Zhytomyr Polissya', *Radioecology*, 88, pp. 28–32 (in Ukrainian).

Pogrebnyak, P. S. (1955) *Fundamentals of forest typology*. Kyiv: Publishing House of the AS of the Ukrainian SSR (in Russian).

POWO (2024) *Plants of the World Online (2017–2024)*. Available at: https://powo.science.kew.org/ (Accessed: 05 November 2024).

Prister, B. S., Loshchilov, N. A., Nemets, O. F. and Poyarkov, V. A. (1991) *Fundamentals of Agricultural Radiology*. Kyiv: Urozhay. ISBN 5-337-00981-8 (in Russian).

Ronneau, C., Sombre, L., Myttenaere, C., Andre, P., Vanhouche, M. and Cara, J. (1991) 'Radiocaesium and potassium behaviour in forest trees', *Journal of Environmental Radioactivity*, 14, pp. 259–268. https://doi.org/10.1016/0265-931X(91)90032-B

Smolders, E., Kiebooms, L., Buysse, J. and Merckx, R. (1996) '^{137}Cs uptake in spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Tonic) at varying K supply', *Plant Soil*, 18(2), pp. 205–209. https://doi.org/10.1007/BF00012054

Vinichuk, M., Johanson, K.J., Rydin, H. and Rosén, K. (2010) 'The distribution of ^{137}Cs, K, Rb and Cs in plants in a *Sphagnum*-dominated peatland in eastern central Sweden', *Journal of Environmental Radioactivity*, 101(2), pp. 170–176. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad. 2009.10.003

Wyttenbach, A., Bajo, S., Bucher, J., Furrer, V., Schleppi, P. and Tobler, L. (1995) 'The concentrations of K, Rb and Cs in spruce needles (*Picea abies* Karst.) and in the associated soils', *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 158, pp. 499–504. https://doi.org/10.1002/jpln.19951580514

Yoshida, S. and Muramatsu, Y. (1998) 'Concentrations of alkali and alkaline earth elements in mushrooms and plants collected in a Japanese pine forest, and their relationship with ^{137}Cs', *Journal of Environmental Radioactivity*, 41(2), pp. 183–205.

Yoshida, S. and Muramatsu, Y. (1999) 'Use of stable elements for predicting radionuclide transport', in Linkov, I. and Schell, W. R. (eds.) *Contaminated Forests: Recent Developments in Risk Identification and Future Perspectives*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 41–49. ISBN 0-7923-5738-8 (HB). https://doi.org/10.1007/978-94-011-4694-4_4

Yoshida, S., Watanabe, M. and Suzuki, A. (2011) 'Distribution of radiocesium and stable elements within a pine tree', *Radiation Protection Dosimetry*, 146(1–3), pp. 326–329. https://doi.org/10.1093/rpd/ncr181

Zhu, Y-G. and Smolders, E. (2000) 'Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application', *Journal of Experimental Botany*, 51(351), pp. 1635–1645. https://doi.org/10.1093/jexbot/51.351.1635

INTENSITY OF 137CS AND 40K ACCUMULATION BY LILY-OF-THE-VALLEY (*CONVALLARIA MAJALIS* L.) IN ZHYTOMYR POLISSIA

Orlov O.O.[1]*, Zhukovskyi O.V.[2], Kurbet T.V.[3], Shevchuk V.V.[4]

The features of ^{137}Cs and ^{40}K accumulation by the phytomass of lily-of-the-valley in Zhytomyr Polissya were considered. It was found that ^{137}Cs activity concentration in the soils of permanent experimental plots was much higher than that of ^{40}K. The opposite pattern was observed in the lily-of-the-valley phytomass: in all permanent experimental plots, the average values of ^{40}K activity concentration in the phytomass of this species significantly exceeded the corresponding ^{137}Cs value. A lognormal distribution of both ^{137}Cs and ^{40}K transfer factors in the link "soil – phytomass" was demonstrated, with an excess in the low-value range. A moderate negative linear relationship between the specific activity of ^{137}Cs and ^{40}K in soil and the value of ^{137}Cs soil-to-plant transfer factor (TF) (r = -0.56) was found. It is satisfactorily approximated by the linear equation $y = 2.50 - 0.021x$. A statistically significant decrease in the intensity of ^{137}Cs accumulation in the link "soil – lily-of-the-valley phytomass" was found with an increase of ^{40}K content in the soil (as an indicator of the macroamounts of total potassium).

K e y w o r d s: cesium-137, potassium-40, activity concentration, transfer factor (TF), soil, phytomass.

Одержано редколегією 20.11.2024

[1]Orlov Oleksandr, PhD (Biology), Senior Researcher, SI "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine", Academician Palladin Avenue 34a, Kyiv, 02000, Ukraine; Poliskyi Branch of the Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G.M. Vysotsky, Neskorenykh Street 2, Dovzhyk, Zhytomyr region, 10004, Ukraine. E-mail: orlov.botany@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2923-5324

[2] Zhukovskyi Oleh, PhD (Agricultural Sciences), Poliskyi Branch of the Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G.M. Vysotsky, Neskorenykh Street 2, Dovzhyk, Zhytomyr region, 10004, Ukraine. E-mail: zh_oleh2183@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3351-9856

[3] Kurbet Tetyana, PhD (Agricultural Sciences), Associate Professor, Zhytomyr Polytechnic State University, Chudnivska Street 103, Zhytomyr, 10005, Ukraine; Poliskyi Branch of the Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G.M. Vysotsky, Neskorenykh Street 2, Dovzhyk, Zhytomyr region, 10004, Ukraine. E-mail: kpn_ktv@ztu.edu.ua, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7820-4263

[4] Shevchuk Viktor, PhD (Agricultural Sciences), Senior Researcher, Poliskyi Branch of the Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky, Neskorenykh Street 2, Dovzhyk, Zhytomyr region, 10004, Ukraine. E-mail: polysskiy_branch@ukr.net, ORCID: https://orcid.org/0009-0000-9121-9881

*Correspondence: orlov.botany@gmail.com