

В. П. Краснов^{1*}, О. О. Орлов^{2,3}, О. В. Жуковський³¹ Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна² ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України», Київ, Україна³ Поліський філіал Українського науково-дослідного інституту лісового господарства і агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, Житомир, Україна

*Відповідальний автор: volodkrasnov@gmail.com

ДИНАМІКА ВМІСТУ ¹³⁷Cs У ТКАНИНАХ І ОРГАНАХ
СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) У ВОЛОГИХ СУБОРАХ ПОЛІССЯ УКРАЇНИ
ПІСЛЯ АВАРІЇ НА ЧАЕС

На основі багаторічних моніторингових спостережень встановлено динаміку інтенсивності надходження ¹³⁷Cs до основних тканин та органів надземної частини фітомаси сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) протягом 30 років з часу аварії на ЧАЕС та особливості їхнього радіоактивного забруднення. Використовувались емпіричні (спостереження), радіоекологічні та статистичні методи. Встановлено, що для деревини характерним було збільшення величин коефіцієнта переходу (КП) у період 1991 - 2002 рр. та подальше монотонне зменшення цього показника до 2020 р.; у внутрішній частині кори, пагонах одно- та дворічних, шпильках одно- та дворічних, гілках товстих та тонких багаторічна динаміка значень КП була подібною: збільшення значень з 1991 до 2002 р. та монотонне зменшення у подальший період. У зовнішній частині кори спостерігалось монотонне зменшення величин КП протягом усього періоду спостережень 1991 - 2020 рр.

Ключові слова: ¹³⁷Cs, питома активність, радіоактивне забруднення, коефіцієнт переходу, соснові насадження.

1. Вступ

Аварія на ЧАЕС призвела до радіоактивного забруднення значної частини лісів Європи. Найбільші площі та рівні радіоактивного забруднення відмічаються в Україні, Білорусі та деяких регіонах західної частини Російської Федерації [1]. Дослідники констатували, що у лісових масивах спостерігаються більші рівні радіоактивного забруднення, ніж на відкритих територіях, розташованих поряд [2]. Крім того, оскільки більша частка площ, уражених аварійними викидами ЧАЕС, знаходиться в зоні хвойних та мішаних бореальних екосистем [3], спостерігається значна мобільність ¹³⁷Cs у системі «грунт - рослини». Останнє зумовлює значні рівні акумуляції згаданого радіонукліда в компонентах фітомаси лісових біогеоценозів. У зв'язку з цим у радіоактивно забруднених районах уже в першій післяаварійний період виникли значні проблеми у використанні деревної продукції лісового господарства [4, 5]. Оскільки в Поліссі України переважають лісові насадження сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.), саме тому з перших років після аварії на ЧАЕС вона стала об'єктом багатьох досліджень. Слід однак зазначити, що переважна більшість їх присвячена окремим проблемам акумуляції ¹³⁷Cs у компонентах фітомаси сосни звичайної, вони були разовими в часі або охоплювали лише кілька років. Зокрема, дослід-

ники встановлювали особливості накопичення ¹³⁷Cs у тканинах та органах сосни звичайної в різних лісорослинних умовах [6 - 8], у деревині й корі на різній висоті стовбура [9, 10], у насадженнях різного віку [11].

Результати багаторічних моніторингових спостережень за накопиченням згаданого радіонукліда в сосні звичайній викладено в незначній кількості публікацій. Так, дослідження, проведені в перші після аварії на ЧАЕС роки [12], дали змогу зробити висновок, що на дерново-підзолистих ґрунтах автоморфних ландшафтів величини та динаміка коефіцієнтів переходу (КП) ¹³⁷Cs у різні частини та органи сосни звичайної мали специфічний характер. Зокрема показано, що для деревини у період 1986 - 1989 рр. відбулося значне зниження даного показника (приблизно у 4,5 раза) з 0,9 до 0,2 м²·кг⁻¹·10⁻³, у 1989 - 1990 рр. – збільшення до 0,5 м²·кг⁻¹·10⁻³, у 1990 - 1992 рр. – зменшення до 0,2 м²·кг⁻¹·10⁻³, після чого відбулося монотонне збільшення до 0,4 м²·кг⁻¹·10⁻³ у 1995 р. В однорічних пагонах, внутрішній частині кори, гілках товстих та тонких величини КП ¹³⁷Cs на порядок більші в порівнянні з деревиною, для них також є характерним значне зменшення значень протягом 1986 - 1989 рр.

Інші дослідники [13] проаналізували динаміку значень КП ¹³⁷Cs у тканинах та органах сосни звичайної, яка зростає у вологих суборах, за 5 років

© В. П. Краснов, О. О. Орлов, О. В. Жуковський, 2021

(1991 - 1995 рр.). Зокрема, наведено дані, що в деревині в період 1991 - 1992 рр. відбулося збільшення значень КП – з 3,58 до 3,85 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, після чого спостерігалось зменшення даного показника з 3,66 (1993 р.) до 2,64 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$ (1995 р.). Для однорічних пагонів наведено суттєве збільшення величини КП ^{137}Cs у період 1991 - 1992 рр. – з 38,1 до 64,4 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, після чого відбулися коливання дослідженого показника, зі значенням у 1995 р. 26,0 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, що, як пояснюють дослідники, зумовлене впливом погодних умов вегетаційного періоду. Також продемонстровано, що для зовнішньої частини кори характерним є монотонне зменшення величин КП протягом 1991 - 1995 рр. – з 11,3 до 6,16 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, що зумовлено її самоочищенням від поверхневого забруднення.

У Білорусі [14] досліджено динаміку акумуляції ^{137}Cs у тканинах та органах сосни звичайної на дальньому сліді радіоактивних випадів за 15-річний період. Авторами публікації показано, що для деревини протягом 1987 - 1990 рр. спостерігалось інтенсивне збільшення величини КП – з 0,3 до 0,7 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, менше у наступний період, з піком 0,8 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$ у 1993 р., після чого величина КП знаходилася на рівні 0,6 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$ з невеликими коливаннями. Для однорічних пагонів зроблено висновок про значне збільшення величини КП у 1987 - 1992 рр. – з 4,0 до 15,0 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, з майже монотонним зменшенням у наступний період – до 6,0 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$ у 2001 р. Динаміка величин КП в однорічну хвою була дуже подібною до наведеної вище, з близь-

кими значеннями. Виявлено монотонне зменшення величин КП ^{137}Cs у кору сосни в період 1987 - 2001 рр. – з 50,0 до 3,0 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$.

Аналіз існуючих літературних джерел дозволяє зробити узагальнення, що опублікованих результатів досліджень інтенсивності акумуляції ^{137}Cs сосною звичайною, які б охоплювали 30-річний період після аварії на ЧАЕС, нами не знайдено. Саме тому представляє значний як науковий, так і практичний інтерес дослідження багаторічної динаміки акумуляції ^{137}Cs у компонентах фітомаси сосни звичайної у Поліссі України, регіоні, що зазнав найбільшого радіоактивного забруднення.

2. Матеріали та методи досліджень

Моніторингові дослідження проведено в Повчанському лісництві ДП «Лугинський лісгосп» (квартал 50, виділ 16) Житомирського обласного управління лісового та мисливського господарства на постійній пробній площі (ППП) розміром 100 × 100 м (1 га). Рельєф на пробній площі рівний, з неглибокими пласкими зниженнями. Тип лісу достатньо поширений у Поліссі України – вологий дубово-сосновий субір (ВзДС). На ділянці зростало чисте соснове насадження (табл. 1). Підріст – дуб звичайний (*Quercus robur* L.), віком 8 - 10 років, 2,2 - 2,7 м заввишки. Підлісок із зімнутістю 0,2 - 0,3, переважно з горобини звичайної (*Sorbus aucuparia* L.) та крушини ламкої (*Frangula alnus* Mill.). Щільність радіоактивного забруднення ґрунту у 1991 р. – $539,6 \pm 65,9$ $\text{кБк} \cdot \text{м}^{-2}$, у 2020 р. – $269,9 \pm 32,0$ $\text{кБк} \cdot \text{м}^{-2}$.

Таблиця 1. Таксаційна характеристика насадження на початку (1991 р.) та кінці (2020 р.) досліджень

Рік спостережень	Склад	Вік, років	Повнота	Клас бонітету	Середня висота, м	Середній діаметр, см
1991	10С+Б	47	0,7	I	19	20
2020	10С+Б	77	0,7	Ia	29	30

Трав'яно-чагарничковий ярус густий, рівномірний, з проективним покриттям 70 - 75 %. У ньому домінувала чорниця (*Vaccinium myrtillus* L.) (50 - 55 %), значну частину займали брусниця (*Vaccinium vitis-idaea* L.) (3 - 5 %), буяхи (*Vaccinium uliginosum* L.) (3 - 5 %), молінія голуба (*Molinia caerulea* (L.) Moench) (1 - 3 %), орляк звичайний (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn.) (1 %) тощо. Моховий ярус мав проективне покриття 94 - 95 %. У ньому співдомінували дикран багатоніжковий (*Dicranum polysetum* Sw. ex anon.) (45 - 48 %) і плеурозій Шребера (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.) (43 - 45 %). На пробній площі представлений сосновий ліс чорнично-зеленомоховий (*Pinetum myrtilloso-hyloco-*

miosum). Ґрунт дерново-середньопідзолистий супіщаний, на флювіогляціальних відкладах; лісова підстилка (H_0), потужністю 5 - 8 см, складалася переважно із хвойного опаду та решток зелених мохів з домішкою опаду чагарничків і трав; гумусово-елювіальний горизонт (HE), потужністю 10 - 15 см, сірий, супіщаний. Найбільш щільно коренезаселений шар ґрунту 25 - 30 см.

Моніторингові спостереження проводили протягом 30 років (1991 - 2020 рр.), регулярно, через 3 - 4 роки. Відбори зразків проводили в кінці вегетаційного періоду. На пробній площі проводили суцільний облік дерев за діаметром та вимірювання висот у понад 100 дерев [15], визначали параметри середнього модельного дере-

ва. Три дерева сосни, близьких за параметрами до середнього модельного, спилували та з них відбирали такі зразки: пагони однорічні, пагони дворічні, шпильки однорічні, шпильки дворічні, гілки тонкі (діаметром до 5 мм), гілки товсті (діаметром 5 мм і більше). Згадані зразки з кожного дерева відбирали у рівних частках з верхньої, середньої та нижньої частин крони дерева. На висоті 1,3 м від поверхні ґрунту зі стовбура дерева відбирали зразки деревини, кори зовнішньої (корку), кори внутрішньої (лубу та камбію). Зразки деревини відбирали шляхом суцільного прорізу стовбура бензомоторною пилою після зняття кори.

З метою оцінки щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs навколо кожного з досліджених дерев відбирали 15 точкових зразків ґрунту циліндричним буром, діаметром 5 см, на глибину 30 см, рівномірно по периметру проєкції крони дерева. Ці зразки об'єднували по 5 шт. у три збірних зразки ґрунту для спектрометричних аналізів. Усі зразки висушували: фітомасу – при 70 °С протягом 72 год; ґрунт – при 80 °С протягом 96 год.

Вимірювання активності ^{137}Cs у трьох (роздільно) підготовлених зразках фітомаси і ґрунту проводили в циліндричних ємностях Марінеллі (об'ємом 1000 см³ та 500 см³) або еталонованих ємностях менших розмірів (ґрунтовий бюкс – 75 см³, «Дента» – 130 см³) на багатоканальному аналізаторі імпульсів «AFORA» LP-4900B з напівпровідниковим детектором ДГДК-80В3 (1991 - 2000 рр.), а у наступний період – на багатоканальному аналізаторі імпульсів СЕГ-005-АКП із

сцинтиляційними детекторами БДЕГ-20Р1 і БДЕГ-20Р2. Середня відносна похибка вимірювання активності радіонукліда дорівнювала 9 % (довірчий рівень 95 %). Результати досліджень статистично опрацьовували у програмах Excel та Statistica. Для аналізу КП ^{137}Cs обраховано середні значення (M), стандартна похибка середнього арифметичного ($\pm m$), стандартне квадратичне відхилення ($\pm Std$), коефіцієнт варіації ($V, \%$) та відносна похибка середнього (точність дослідження) ($P, \%$). Стандартне квадратичне відхилення ($\pm Std$) слугувало величиною невизначеності при ймовірності 95 % [16]. Величина КП ^{137}Cs (м²·кг⁻¹·10⁻³) визначалась як відношення питомої активності радіонукліда в певній частині стовбура сосни звичайної до щільності радіоактивного забруднення ґрунту.

3. Результати та обговорення

Розрахунки КП ^{137}Cs в тканини та органи сосни звичайної у 2020 р. підтверджують отримані у попередні роки спостережень закономірності: найбільші величини даного показника (табл. 2) властиві однорічним пагонам ($38,0 \pm 1,12 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$) та шпилькам ($34,2 \pm 5,52 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$). Це може вказувати на продовження достатньо інтенсивного кореневого надходження радіонукліда до сосни звичайної. Значення КП ^{137}Cs у дворічні пагони ($20,7 \pm 0,87 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$) та шпильки ($15,7 \pm 0,82 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$) також достатньо високі, але вони значно нижчі від отриманих для однорічних органів.

Таблиця 2. Статистичні показники КП ^{137}Cs у тканини та органи сосни звичайної у 2020 р.

Показники		Статистики					
		M	$\pm m$	$\pm Std$	$V, \%$	$P, \%$	
Щільність радіоактивного забруднення ґрунту, кБк·м ⁻²		269,9	18,50	32,03	11,9	6,9	
КП ^{137}Cs в тканини та органи сосни звичайної, м ² ·кг ⁻¹ ·10 ⁻³	деревина	2,7	0,09	0,16	6,0	3,5	
	кора	зовнішня частина	4,3	0,08	0,14	3,2	1,8
		внутрішня частина	18,6	0,69	1,20	6,4	3,7
	пагони	однорічні	38,0	0,65	1,12	3,0	1,7
		дворічні	20,7	0,50	0,87	4,2	2,4
	шпильки	однорічні	34,2	3,20	5,52	16,2	9,3
дворічні		15,7	0,47	0,82	5,2	3,0	

Привертають увагу дані щодо величин КП ^{137}Cs для внутрішньої та зовнішньої частин кори. У першому випадку вони достатньо високі – $18,6 \pm 1,20 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, що у 4,3 раза більше, ніж у другої – $4,3 \pm 1,14 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$. Це також підтверджує, що радіонукліди досить інтенсивно надходять до деревних порід кореневим шляхом. Відомо, що внутрішня частина кори (луб) попов-

нюється щорічними шарами за рахунок діяльності твірної тканини – камбію. Найменші значення КП ^{137}Cs ми отримали для деревини – $2,7 \pm 0,16 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$. Зовнішні шари деревини також поповнюється за рахунок діяльності камбію, але оскільки для визначення середньої питомої активності ^{137}Cs в деревині ми формували зразок таким чином, щоб у ньому було представ-

лено всі річні кільця деревини стовбура сосни звичайної, частина цих шарів була утворена до Чорнобильської аварії та надходження радіонуклідів до лісових екосистем, тому внутрішні її шари мали незначний вміст їх. Результати попередніх досліджень також вказували, що питома активність ^{137}Cs в периферійних кільцях значно вища, ніж у центрі стовбура [13].

При дослідженні динаміки КП ^{137}Cs у внутрішню частину кори і деревину сосни звичайної на

висоті стовбура 1,3 м встановлено, що протягом перших 12 - 13 років (до 2002 р.) з часу початку спостережень (1991 р.) відбувається збільшення інтенсивності надходження радіонукліда (рис. 1). Величина КП ^{137}Cs у внутрішню частину кори збільшується від $11,0 \pm 0,58$ до $23,2 \pm 0,88 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$ (у 2,1 раза), у деревину від $2,3 \pm 0,01$ до $5,5 \pm 0,08 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$ (у 2,4 раза). Збільшення показника протягом вказаного періоду достатньо близьке.

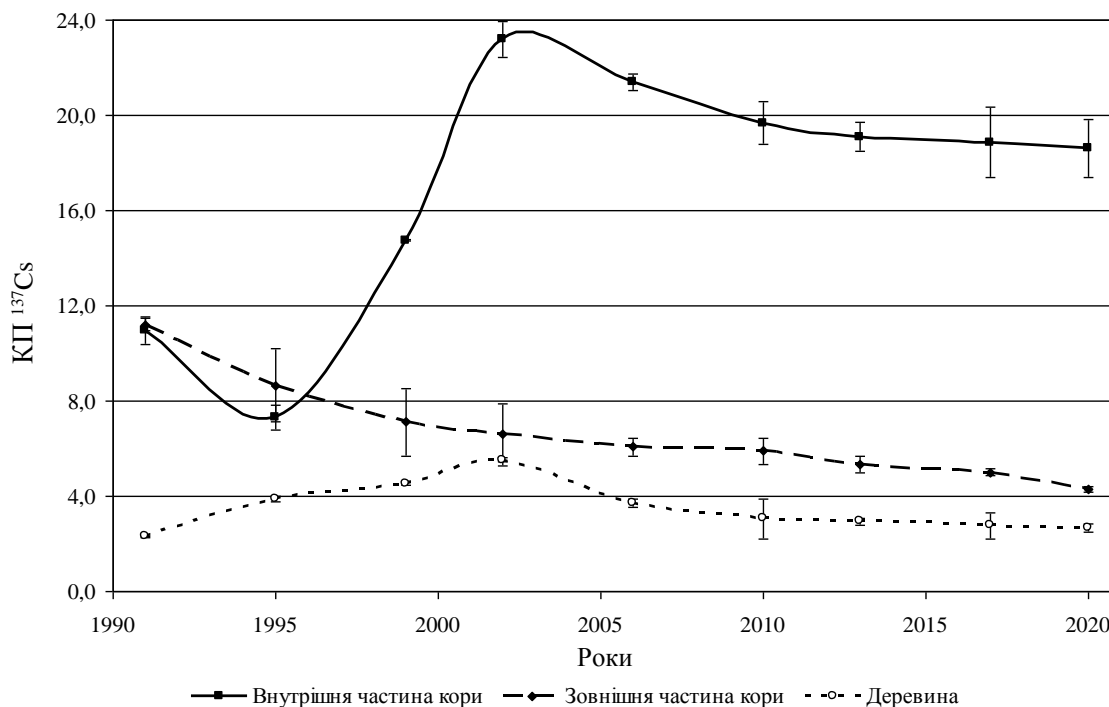


Рис. 1. Багаторічна динаміка КП ^{137}Cs у внутрішню та зовнішню частини кори і деревину сосни звичайної на висоті стовбура 1,3 м.

У наступний період до 2020 р. спостерігається монотонне зменшення величин КП ^{137}Cs у внутрішню частину кори (до $18,6 \pm 1,20 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$) і деревину (до $2,7 \pm 0,16 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$) на висоті стовбура сосни звичайної 1,3 м. Тобто інтенсивність надходження радіонукліда знижується. Однак темпи зниження величини КП ^{137}Cs у деревину дещо більші, ніж до внутрішньої частини кори. Збільшення інтенсивності надходження ^{137}Cs у внутрішню частину кори і деревину на висоті стовбура 1,3 м сосни звичайної у перший період спостережень може пояснюватись переміщенням його основної кількості до того шару ґрунту, де знаходиться основна кількість сисних коренів деревної породи, а зменшення у наступний період декількома факторами – деяким закріпленням у ґрунті, переміщенням до компонентів лісової екосистеми та, можливо, природним розпадом радіонукліда. Загальна динаміка інтенсивності надходження ^{137}Cs найбільш тісно описується поліноміальними рівняннями другого порядку (величина коефіцієнтів детермінації найбільша): для внутрішньої час-

тини кори – $y = -0,033x^2 + 131,9x - 132526$ ($R^2 = 0,67$); для деревини – $y = -0,008x^2 + 32,7x - 32754$ ($R^2 = 0,52$). Інтенсивність надходження ^{137}Cs до зовнішньої частини кори послідовно зменшувалася з 1991 до 2020 р. від $11,2 \pm 0,24$ до $4,3 \pm 1,14 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$ (у 2,6 раза). Динаміка цього процесу також описується поліноміальними рівняннями другого порядку – $y = 0,008x^2 - 31,6x + 31910$ ($R^2 = 0,95$).

Подібні закономірності динаміки величин КП ^{137}Cs до наведених вище визначені також для однорічних і дворічних пагонів та шпильок – вони збільшувалися з 1991 до 2002 р., а у наступному – поступово зменшувалися (рис. 2).

Величина КП ^{137}Cs збільшувалась протягом 1991 - 2002 рр.: у однорічні пагони від $26,9 \pm 1,22$ до $46,5 \pm 0,66 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, у дворічні пагони від $14,2 \pm 0,63$ до $27,2 \pm 1,39 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, у однорічні шпильки від $26,2 \pm 1,25$ до $44,7 \pm 1,24 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$, у дворічні шпильки від $13,7 \pm 0,46$ до $24,2 \pm 0,35 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$. У наступні роки спостерігалось поступове зменшення КП.

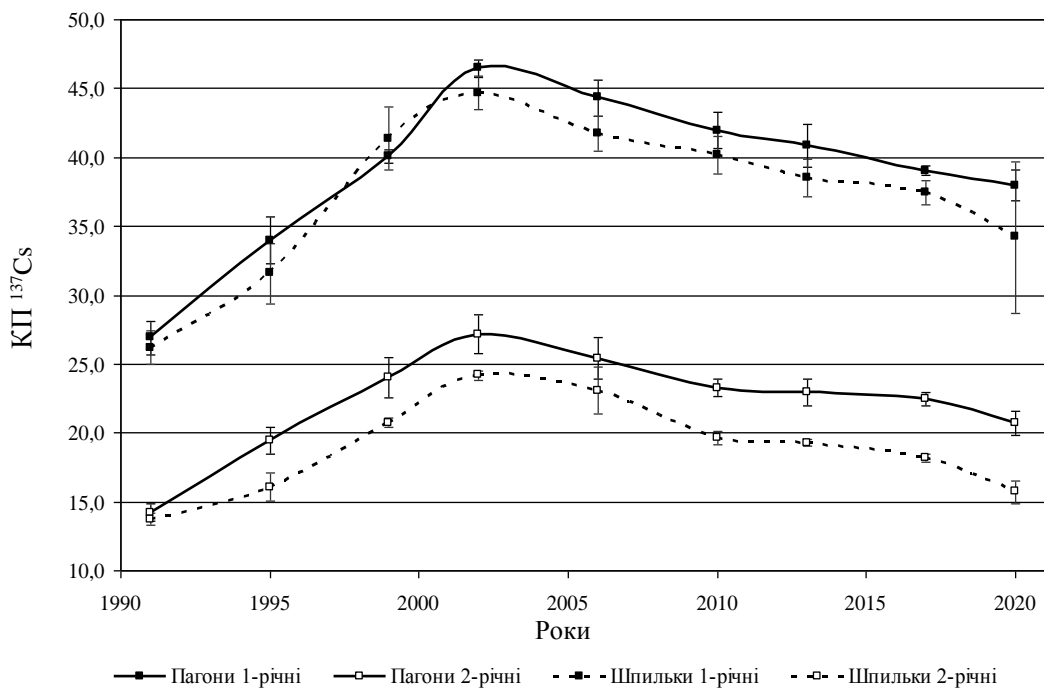


Рис. 2. Багаторічна динаміка КП ¹³⁷Cs в одно- та дворічні пагони та шпильки сосни звичайної.

Динаміка змін показника, який вивчався протягом періоду спостережень, також апроксимуються поліноміальними рівняннями другого порядку:

для однорічних пагонів $y = -0,059x^2 + 234,9x - 235748$ ($R^2 = 0,88$);

для дворічних пагонів $y = -0,039x^2 + 156,9x - 157460$ ($R^2 = 0,85$);

для однорічних шпильок $y = -0,061x^2 + 246,3x - 247134$ ($R^2 = 0,86$);

для дворічних шпильок $y = -0,038x^2 + 152,9x - 153324$ ($R^2 = 0,83$).

Установлені закономірності багаторічної динаміки КП ¹³⁷Cs до тканин та органів сосни звичайної підтверджуються також динамікою питомої активності в них (рис. 3 і 4).

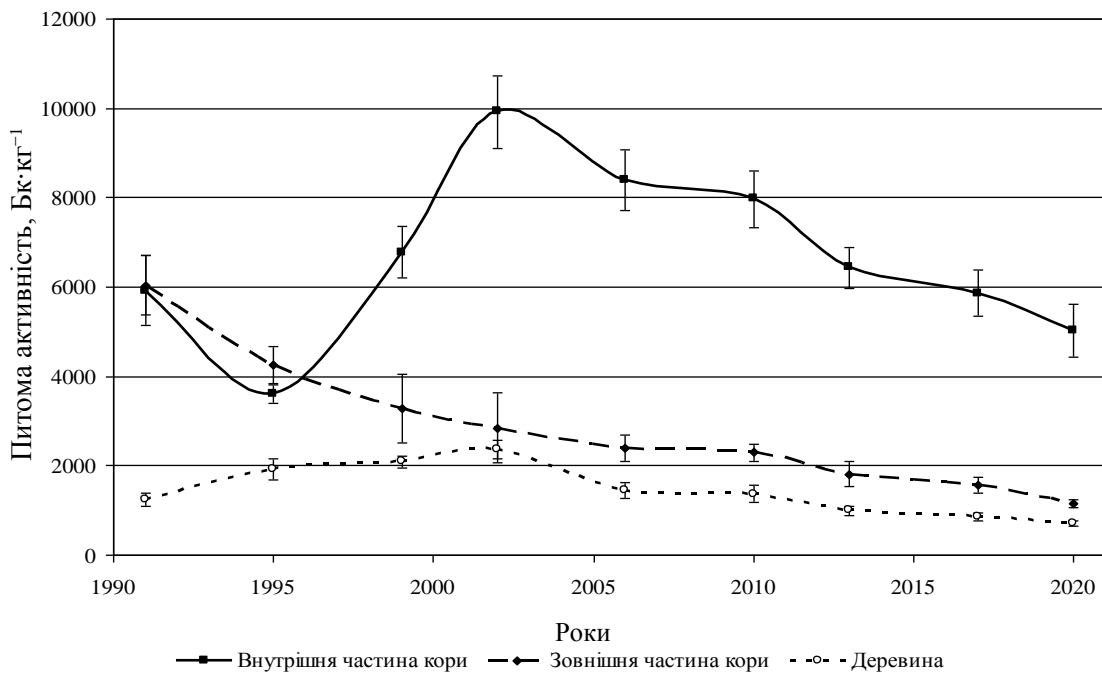


Рис. 3. Багаторічна динаміка питомої активності ¹³⁷Cs у корі та деревині сосни звичайної на висоті стовбура 1,3 м.

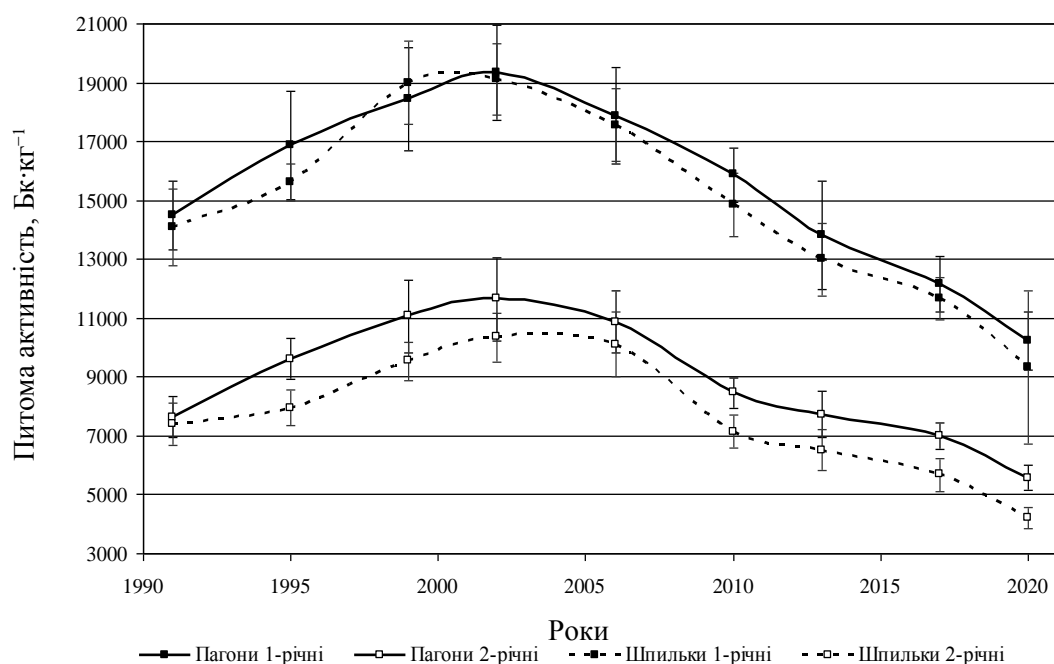


Рис. 4. Багаторічна динаміка питомої активності ^{137}Cs в пагонах і шпильках сосни звичайної.

Накопичення ^{137}Cs в корі і деревині сосни звичайної на висоті стовбура 1,3 м у вологому суборі (В₃) апроксимується поліноміальними рівняннями другого порядку:

для внутрішньої частини кори – $y = -16,505x^2 + 66209x - 7 \cdot 10^7$ ($R^2 = 0,51$);

для зовнішньої частини кори – $y = 5,338x^2 - 21554x + 2 \cdot 10^7$ ($R^2 = 0,96$);

для деревини – $y = -3,760x^2 + 15045x - 2 \cdot 10^7$ ($R^2 = 0,73$).

Накопичення ^{137}Cs у пагонах і шпильках сосни звичайної у вологому суборі апроксимувалося поліноміальними рівняннями другого порядку:

для однорічних шпильок – $y = -28,617x^2 + 114579x - 1 \cdot 10^8$ ($R^2 = 0,91$);

для однорічних пагонів – $y = -27,048x^2 + 108301x - 1 \cdot 10^8$ ($R^2 = 0,94$);

для дворічних шпильок – $y = -17,477x^2 + 69974x - 7 \cdot 10^7$ ($R^2 = 0,87$);

для однорічних пагонів – $y = -18,993x^2 + 76068x - 8 \cdot 10^7$ ($R^2 = 0,87$).

Співставлення результатів визначення КП у різні роки спостережень протягом 30 років дало змогу виявити деякі тенденції. Зокрема виявлено, що для більшої частини тканин та органів сосни звичайної у дисперсійних парах 2006 - 2013 рр., 2006 - 2017 рр., 2006 - 2020 рр. наявна статистично достовірна різниця середніх значень КП ($F_{\text{факт}} = 7,96 - 41,60 > F_{0,95} = 7,71$; $p = 0,04 - < 0,01$); подібна картина також спостерігається у дисперсійних парах 2002 - 2010 рр., 2002 - 2013 рр., 2002 - 2017 рр., 2002 - 2020 рр. ($F_{\text{факт}} = 9,22 - 527,38 > F_{0,95} = 7,71$; $p = 0,04 - < 0,01$). Таким чином, правомірно стверджувати, що у

випадках, коли відсутня статистично достовірна різниця середніх значень КП ^{137}Cs у сусідні періоди спостережень, вона наявна в дисперсійних парах через два періоди спостережень, тобто через 6 - 8 років.

4. Висновки

1. Розрахунки КП ^{137}Cs в тканини та органи сосни звичайної у 2020 р. підтверджують отримані в попередні роки спостережень закономірності: найбільші величини даного показника властиві фізіологічно активним органам – однорічним пагонам ($38,0 \pm 1,12 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$) та однорічним шпилькам ($34,2 \pm 5,52 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$).

2. Багаторічна динаміка величин КП ^{137}Cs в тканини та органи сосни звичайної характеризується певною специфікою:

для деревини характерним було збільшення величин КП у період 1991 - 2002 рр. з 2,29 до $5,52 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$ та подальше монотонне зменшення цього показника до 2020 р.;

у зовнішній частині кори спостерігалось монотонне зменшення величин КП протягом всього періоду спостережень 1991 - 2020 рр. – з 11,21 до $4,29 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot 10^{-3}$;

у внутрішній частині кори, одно- та дворічних пагонах, одно- та дворічних шпильках, гілках товстих та тонких багаторічна динаміка значень КП була схожою: спостерігалось збільшення значень з 1991 до 2002 р. та монотонне зменшення в подальший період.

3. Динаміка величин КП у тканини та органи сосни звичайної, що досліджувались, за період спостережень задовільно апроксимуються поліноміальними рівняннями другого ступеня.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Национальный доклад Украины «10 лет после аварии на Чернобыльской АЭС» (К., 1996).
2. Ф.А. Тихомиров, А.И. Щеглов. Последствия радиоактивного загрязнения лесов в зоне влияния аварии на ЧАЭС. Радиационная биология. Радиоэкология 37(4) (1997) 664.
3. Ю.А. Израэль и др. Загрязнение окружающей среды вследствие Чернобыльской аварии. У кн.: Матер. міжнарод. конф. «П'ятнадцять років Чорнобильської катастрофи. Досвід подолання», Київ, 18 - 20 квітня 2001 р. (К., 2001).
4. Н.Н. Калетник и др. Пути ведения лесного хозяйства в зоне радиоактивного загрязнения. В кн.: Докл. I Всесоюз. науч.-техн. совещ. по итогам ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС «Чернобыль-88», Т. 4 (Чернобыль, 1989).
5. Ф.А. Тихомиров, А.И. Щеглов. Проблемы радиоэкологии леса и лесного хозяйства в зоне радиоактивного загрязнения от аварии на ЧАЭС. In: *One decade after Chernobyl: Summing up the consequences of the accident. Poster presentations, Vol. 1. Int. Conf. Vienna, 8 - 12 April 1996 (Vienna, 1997)*.
6. В.П. Краснов та ін. Накопичення цезію-137 сосною звичайною. Лісівництво і агролісомеліорація 88 (1994) 19.
7. И.М. Булавик, А.Н. Переволоцкий, А.З. Гайдуль. Особенности накопления ^{137}Cs основными насаждениями. Проблемы лесоведения и лесоводства. Лесная наука на рубеже XXI века 46 (1997) 408.
8. А.Н. Переволоцкий, И.М. Булавик. Влияние эдафических факторов на коэффициент перехода ^{137}Cs в древесину сосны и ели. В кн.: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Леса Европейского региона – устойчивое управление и развитие», Минск, 4 - 6 декабря 2002 г. Ч. 2 (Минск, 2002) с. 77.
9. Y. Thiry, F. Goor, T. Reisen. The true distribution and accumulation of radiocaesium in stem of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Journal of Environmental Radioactivity* 58 (2002) 243.
10. D. Holiaka et al. Distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity concentrations in trunk of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Chernobyl zone. *Journal of Environmental Radioactivity* 222 (2020) 106319.
11. М. М. Сак. Аккумуляция цезия-134, 137 разновозрастными растениями сосны обыкновенной. В кн.: Тез. докл. Междунар. раб. совещ. по Чернобыльской экологич. исследоват. сети «Экологический статус загрязненных радионуклидами территорий», Минск, 19 - 20 апреля 1995 г. (Минск, 1995).
12. А.И. Щеглов. *Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: по материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС* (Москва: Наука, 1999) 268 с.
13. В.П. Краснов. *Радиоэкологія лісів Полісся України* (Житомир: Волинь, 1998) 112 с.
14. А.Н. Переволоцкий. *Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах* (Гомель: Ин-т радиологии, 2006) 255 с.
15. Н.П. Анучин. *Лесная таксация* (Москва: Лесная промышленность, 1977) 512 с.
16. О.М. Царенко та ін. *Комп'ютерні методи в сільському господарстві та біології* (Суми: Університетська книга, 2000) 203 с.

V. P. Krasnov^{1,*}, O. O. Orlov^{2,3}, O. V. Zhukovskiy³

¹ State University «Zhytomyr Polytechnica», Zhytomyr, Ukraine

² State Institution «Institute of Environment Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine

³ Poliskyi Branch of the Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky, Zhytomyr, Ukraine

*Corresponding author: volodkrasnov@gmail.com

DYNAMICS OF ^{137}Cs CONTENT IN TISSUES AND ORGANS OF SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) IN MOIST FAIRLY INFERTILE PINE TYPE OF POLISSYA OF UKRAINE AFTER CHORNOBYL ACCIDENT

Based on multiyear monitoring observations, dynamics of ^{137}Cs intake into the main tissues and organs of above-ground phytomass of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) during 30 years from the Chornobyl accident was determined as well peculiarities of their radioactive contamination. Empirical (observations), radioecological and statistical methods were used. It was found that for the wood increase of values of transfer factor was observed between 1991 and 2002 yrs with the further monotonous decrease of this value up to 2020; in internal bark, 1-year shoots, 2-year shoots, 1-year needles, 2-year needles, twigs thick and twigs thin multiyear dynamics was similar – an increase of values of transfer factor in the period of 1991 - 2002 yrs with further decrease of it up to 2020. At external bark, monotonous decrease of values of transfer factor was found during the whole observation period 1991 - 2020.

Keywords: ^{137}Cs , specific activity, radioactive contamination, transfer factor, pine plantations.

REFERENCES

1. National report of Ukraine “10 years after the accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant” (Kyiv, 1996). (Rus)
2. F.A. Tikhomirov, A.I. Shcheglov. Consequences of radioactive contamination of forests in the zone of influence of the Chernobyl accident. *Radiation Biology. Radioecology* 37(4) (1997) 664. (Rus)
3. Yu.A. Israel et al. Pollution of the environment due to the Chernobyl accident. In: Proc. of the Int. Conf. “Fifteen years of the Chernobyl accident. Experience of overcoming”, Kyiv, April 18 - 20, 2001 (Kyiv, 2001). (Rus)
4. N.N. Kaletnik et al. Ways of forestry in the area of radioactive contamination. In: Proc. of the I All-Union. Sci. and Techn. Meeting following the liquidation of the consequences of the Chernobyl accident “Chernobyl-88”, Vol. 4 (Chernobyl, 1989). (Rus)
5. F.A. Tikhomirov, A.I. Shcheglov. Problems of radioecology of forests and forestry in the zone of radioactive contamination from the Chernobyl accident. In: [One decade after Chernobyl: Summing up the consequences of the accident. Poster presentations, Vol. 1. Int. Conf. Vienna, 8 - 12 April 1996 \(Vienna, 1997\)](#). (Rus)
6. V.P. Krasnov et al. Accumulation of cesium-137 by Scots pine. *Lisivnytstvo i Ahrolisomelioratsiya* 88 (1994) 19. (Ukr)
7. I.M. Bulavik, A.N. Perevolotsky, A.Z. Gaidul. Features of ^{137}Cs accumulation by pine plantations. *Problemy Lesovedeniya i Lesovodstva. Lesnaya Nauka na Rubezhe XXI Veka* 46 (1997) 408. (Rus)
8. A.N. Perevolotsky, I.M. Bulavik. Influence of edaphic factors on the conversion factor of ^{137}Cs into pine and spruce wood. In: Mater. International Sci.-Pract. Conf. “Forests of the European Region – sustainable management and development”, Minsk, December 4 - 6, 2002. Part 2 (Minsk, 2002) p. 77. (Rus)
9. Y. Thiry, F. Goor, T. Reisen. The true distribution and accumulation of radiocaesium in stem of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). [Journal of Environmental Radioactivity](#) 58 (2002) 243.
10. D. Holiaka et al. Distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity concentrations in trunk of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Chernobyl zone. [Journal of Environmental Radioactivity](#) 222 (2020) 106319.
11. M.M. Sak. Accumulation of cesium-134, 137 by plants of Scots pine of different ages. In: Book of Abstracts. Int. work meeting on the Chernobyl ecological research network “Ecological Status of Radionuclide-Contaminated Areas”, Minsk, April 19 - 20, 1995 (Minsk, 1995). (Rus)
12. A.I. Shcheglov. *Biogeochemistry of Technogenic Radionuclides in Forest Ecosystems: Based on the Materials of 10 years of Research in the Zone of Influence of the Chernobyl Accident* (Moskva: Nauka, 1999) 268 p. (Rus)
13. V.P. Krasnov. *Radioecology of Forests of Polissya of Ukraine* (Zhytomyr: Volyn, 1998) 112 p. (Ukr)
14. A.N. Perevolotsky. *Distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in Forest Biogeocenoses* (Gomel: Institute of Radiology, 2006) 255 p. (Rus)
15. N.P. Anuchin. *Forest taxation* (Moskva: Lesnaya Promyshlennost, 1977) 512 p. (Rus)
16. O.M. Tsarenko et al. [Computer Methods in Agriculture and Biology](#) (Sumy: University Book, 2000) 203 p. (Ukr)

Надійшла/Received 07.06.2021