

РАДІОБІОЛОГІЯ

УДК 504.054:635.8

¹³⁷Cs ТА ⁴⁰K У РОСЛИНАХ БОРЕАЛЬНИХ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ: ЕФЕКТ ЗАСТОСУВАННЯ КАЛІЙНИХ ДОБРИВ

© 2011 р. М. М. Вінічук^{1,2}, І. Ніколова²

¹Житомирський державний технологічний університет
(Житомир, Україна)

²Шведський університет сільськогосподарських наук
(Упсала, Швеція)

Проведено порівняльний аналіз співвідношення активності радіоактивного цезію (¹³⁷Cs) та калію (⁴⁰K) у рослинах вересу звичайного (*Calluna vulgaris* L.), чорниці (*Vaccinium myrtillus* L.) та брусниці (*Vaccinium vitis-idaea* L.) в бореальних лісових екосистемах Центральної Швеції після внесення калійних добрив. Показано вплив калійного удобрення на співвідношення ізотопів калію та цезію у рослинах та проаналізовано залежності між цими ізотопами при їх надходженні у рослини.

Ключові слова: *Calluna vulgaris*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, калій, калійні добрива, радіоцезій

У лісових екосистемах, забруднених радіонуклідами внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, крім грибів, багато радіоактивного цезію накопичують також типові лісові рослини родини вересові (*Ericaceae*) – верес звичайний (*Calluna vulgaris* L.), чорниця (*Vaccinium myrtillus* L.) та брусниця (*Vaccinium vitis-idaea* L.) (Rosén et al., 2009; Vinichuk et al., 2011). Рівні радіоактивності рослин також варіюють залежно від виду рослин, особливостей поширення кореневої системи та ґрунту. Рослини, корені яких містяться переважно у верхніх шарах ґрунту, накопичують більше радіоцезію, тоді як для тих, що мають стрижневу кореневу систему, характерне менше накопичення радіонуклідів (Rosén et al., 2009; Vinichuk et al., 2011). Хоча рівень ¹³⁷Cs у рослин родини Вересові, зокрема вересу звичайного, за останні 15-20 років помітно знизився, він все ще досить високий порівняно з іншими видами судинних рослин, таких як морозка приземкувата (*Rubus*

chamaemorus), бобівник трилистий (*Menyanthes trifoliata* L.) і журавлина (*Vaccinium oxycoccus* та *Vaccinium microcarpon*) (Rosén et al., 2009; Vinichuk et al., 2011). Ефективно поглинають ¹³⁷Cs також чорниця (*Vaccinium myrtillus* L.) та брусниця (*Vaccinium vitis-idaea* L.), які, крім того, входять до складу раціону диких тварин (Johanson, Kardell, 1996).

Відомо, що біологічна доступність ¹³⁷Cs у ґрунті залежить від концентрації інших моновалентних катіонів, зокрема калію. Внесення підвищених доз калійних добрив є ефективним контрзаходом, спрямованим на зменшення надходження ¹³⁷Cs у сільськогосподарські рослини (Rosén, 1996). Ефективність внесення калійних добрив в умовах лісових ґрунтів вивчалась у кількох роботах (Levula et al., 2000; Kaunisto et al., 2002). Нами було показано (Rosén et al., 2011), що внесення калійних добрив забезпечує довготривале зниження рівня накопичення ¹³⁷Cs (до 60%) не тільки лісовими рослинами, а й плодовими тілами грибів. Проте кореляційний зв'язок між концентрацією активності ¹³⁷Cs та концентрацією стабільного калію або взагалі відсутній, наприклад, у плодових тілах грибів

Адреса для кореспонденції: Вінічук Михайло Маркович, Житомирський державний технологічний університет, вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, 10005, Україна; e-mail: Mykhailo.Vinichuk@slu.se

(Vinichuk et al., 2011), або є досить слабким, як у сфагнових мохах (Vinichuk et al., 2010). Таким чином, існує певне протиріччя: з одного боку, відсутність зв'язку між надходженням калію та ¹³⁷Cs, з іншого – зниження рівня накопичення ¹³⁷Cs при внесенні калійних добрив.

Метою даного дослідження стало порівняння співвідношення активності ¹³⁷Cs та ⁴⁰K у рослинах вересу звичайного, чорниці та брусниці, що зростають на удобреній калійними добривами ділянці та контрольних рослин (без удобрення). Наша робоча гіпотеза полягала у тому, що активна концентрація ¹³⁷Cs у дослідних рослинах (після удобрення) знижуватиметься, а концентрація ⁴⁰K зростатиме; співвідношення ¹³⁷Cs/⁴⁰K у дослідних рослинах (після удобрення) буде вужчим ніж у контрольних.

МЕТОДИКА

Дослідження проводились у лісових екосистемах центральної Швеції (66°59'50" пн. ш; 15°73'60" сх. д.) в період з 1993 до 1997 рр. Рівень забруднення за ¹³⁷Cs становив 33±10 кБк м⁻² (Johanson, Bergström, 1994). Ґрунти (за класифікацією ФАО/WRB) Folc Leptosol та Harpic Podzol (WRB, 2006). Вміст органічної речовини у верхньому шарі ґрунту понад 70%, рН близько 4, обмінного калію від 480 (верхній органічний шар) до 35 (мінеральний горизонт) мг/кг ґрунту. У насадженнях переважає сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) та ялина європейська (*Picea abies*) з домішками берези (*Betula pendula* та *Betula pubescens*). У трав'янистому покриві переважають брусниця, чорниця та верес.

Для досліджень було вибрано дві дослідних ділянки, розміщених на відстані приблизно 0,4 км одна від одної: контрольна (без внесення добрив, К-) та дослідна (з внесенням калійних

добрив, К+). Площа обох ділянок близько 1 га. Калійні добрива (KCl) були внесені шляхом розкидання їх по поверхні ґрунту з використанням розкидача мінеральних добрив на початку червня 1992 р. з розрахунку 200 кг KCl (100 кг К)/га. Розрахункова доза внесеного калію становила приблизно 30-40% доступного калію ґрунту.

Для досліджень відбирались надземні зелені частини рослин, зазвичай у серпні-вересні протягом 1993-1997 рр. У лабораторії проби рослинного матеріалу висушували при 80-90°C, подрібнювали для отримання однорідного матеріалу, просіювали через сито з отворами 2 мм і вимірювали вміст ¹³⁷Cs та ⁴⁰K. Активність ¹³⁷Cs та ⁴⁰K у рослинах вимірювали на напівпровідникових германієвих детекторах в низькофоновій лабораторії Шведського університету сільськогосподарських наук. Час вимірювання забезпечував отримання статистичної похибки в діапазоні від 5 до 10% для ¹³⁷Cs та до 20-25% для ⁴⁰K (Бк кг⁻¹ сухої маси) з поправкою на дату відбору. Статистична обробка результатів проводилася з використанням Minitab (© 2007 MinitabInc) програмного забезпечення.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Результати досліджень показали, що концентрація активності ¹³⁷Cs у рослинах дослідної (К+) ділянки варіювала у ширшому діапазоні (37,9; 43,2 та 37,7%) порівняно з рослинами контрольної (К-) ділянки (24,8, 34,9 та 30,6%) відповідно у вересі, чорниці та брусниці (таблиця). Активна концентрація активності ⁴⁰K варіювала у ширшому діапазоні (40-46%) і не залежала від удобрення. Активність ¹³⁷Cs у рослинах дослідної (К+) ділянки знизилась у 2,2-3,7 раза порівняно з контрольною (К-), тоді як активність ⁴⁰K або зменшувалася (верес, брусниця), або залишилась незмінною (чорниця).

**Активність ¹³⁷Cs та ⁴⁰K у рослинах, Бк кг⁻¹
(середні значення, М±m; коефіцієнт варіації, V)**

Параметри	n*	К-		К+		Відношення К+/К-	
		¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
Верес звичайний							
М±m	59	12715±2464	143±44,2	3426±967	187±53,7	3,7	0,77
V		24,8	39,7	37,9	46,4		
Чорниця							
М±m	57	2698±685	207±66,4	878±180	205±65,0	3,1	1,01
V		34,9	42,1	43,2	41,1		
Брусниця							
М±m	56	2211±518	130±46,4	1001±292	172±69,2	2,2	0,76
V		30,6	45,1	37,7	44,6		

Примітка. n – кількість проаналізованих зразків.

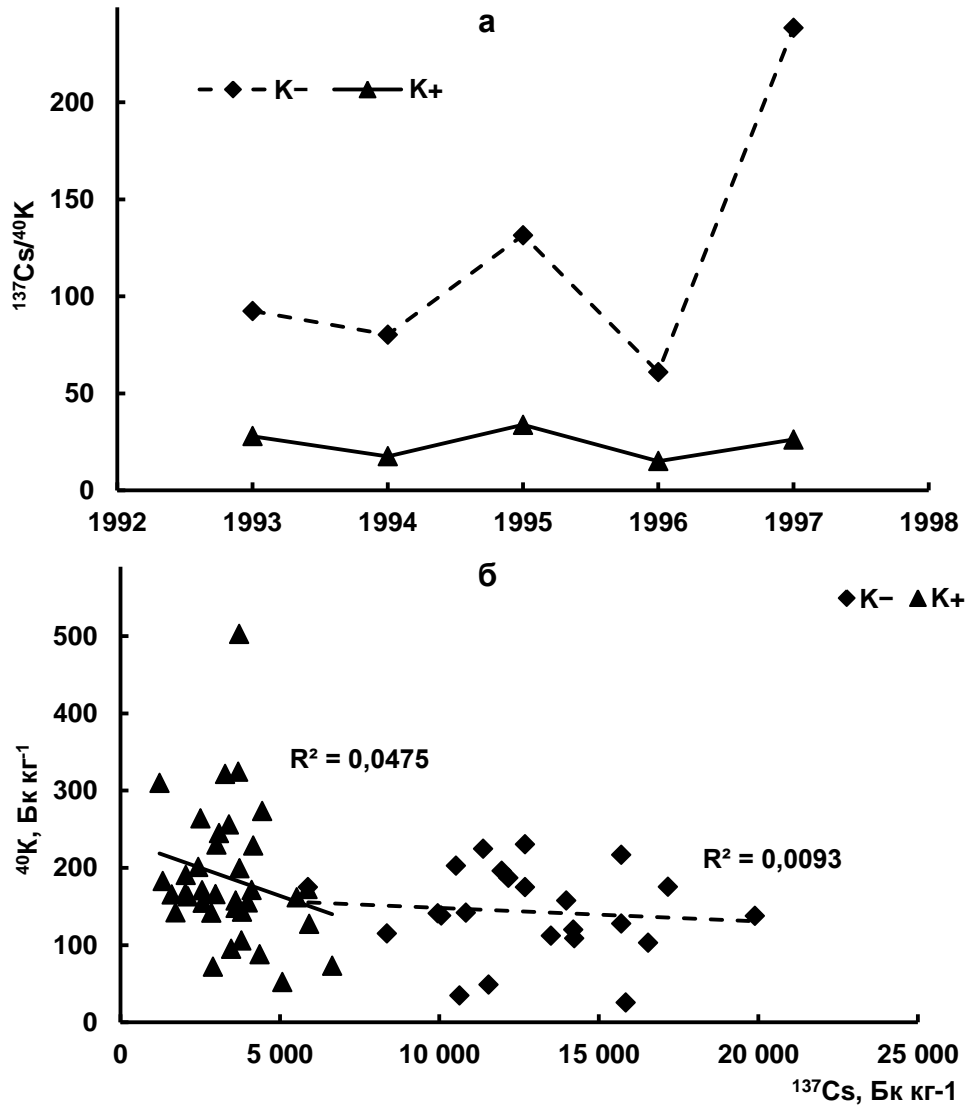


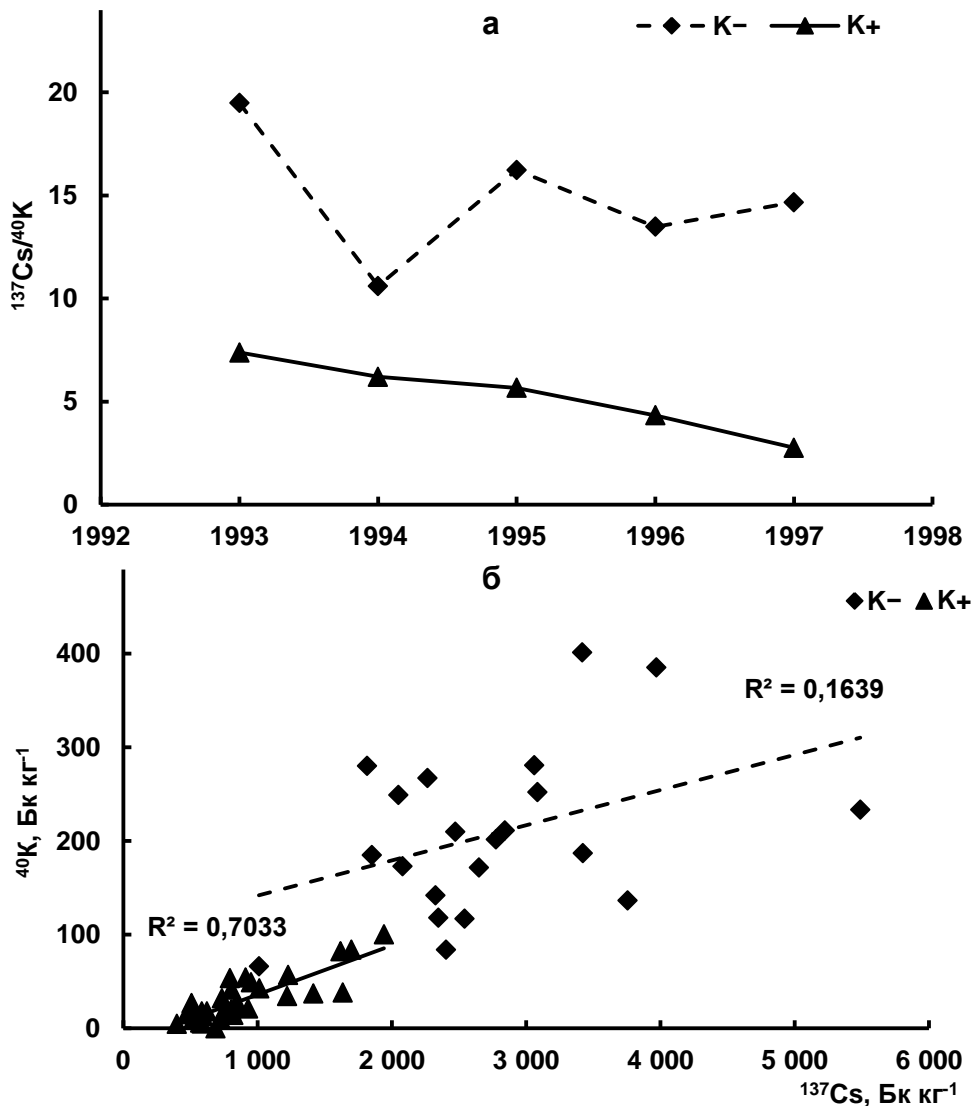
Рис. 1. Співвідношення активності $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ у рослинах вересу звичайного (а) та залежність активності ^{137}Cs та ^{40}K (б).

Співвідношення активності $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ у рослинах вересу звичайного, чорниці та брусниці, зібраних на контрольній (K-) та дослідній (K+) ділянках, наведені на рис. 1а, 2а та 3а відповідно. Як видно з наведених даних, співвідношення активності $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ в усіх трьох видів досліджуваних рослин є ширшим на контрольній ділянці порівняно з дослідною ділянкою.

У рослинах вересу (рис. 1а) співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ виявилось приблизно в шість (K-) та чотири (K+) рази ширшим, ніж у рослинах чорниці (рис. 2а) та брусниці (рис. 3а). В цілому за роки досліджень у чорниці та брусниці, зібраних як на контрольній, так і дослідній ділянках, співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ мали тенденцію до звуження, тоді як у вересу вони залишалися або сталими (K-), або навіть зростали (K+).

Іншими словами, ефект від внесення калійних добрив, тобто звуження співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ помітно вищим у вересу (рис. 1а), ніж у чорниці та брусниці (рис. 2а, 3а). Так, в середньому, співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ у вересу на дослідній ділянці приблизно у п'ять разів вужче ніж на контрольній, тоді як у чорниці та брусниці спостерігається приблизно триразове звуження згаданого співвідношення.

В цілому одноразове внесення калійних добрив у лісових екосистемах спричинило статистично достовірне ($p < 0,001$) зниження рівня накопичення ^{137}Cs у досліджуваних рослин, хоча реакція рослин на удобрення була різною. Так, в середньому за період з 1992 до 2009 рр. рівні накопичення ^{137}Cs рослинами вересу на дослідній ділянці порівняно з контрольною були нижчими на 61%, у рослин чорниці – на 48%, у рослин брусниці – на 40% (Rosén et al.,



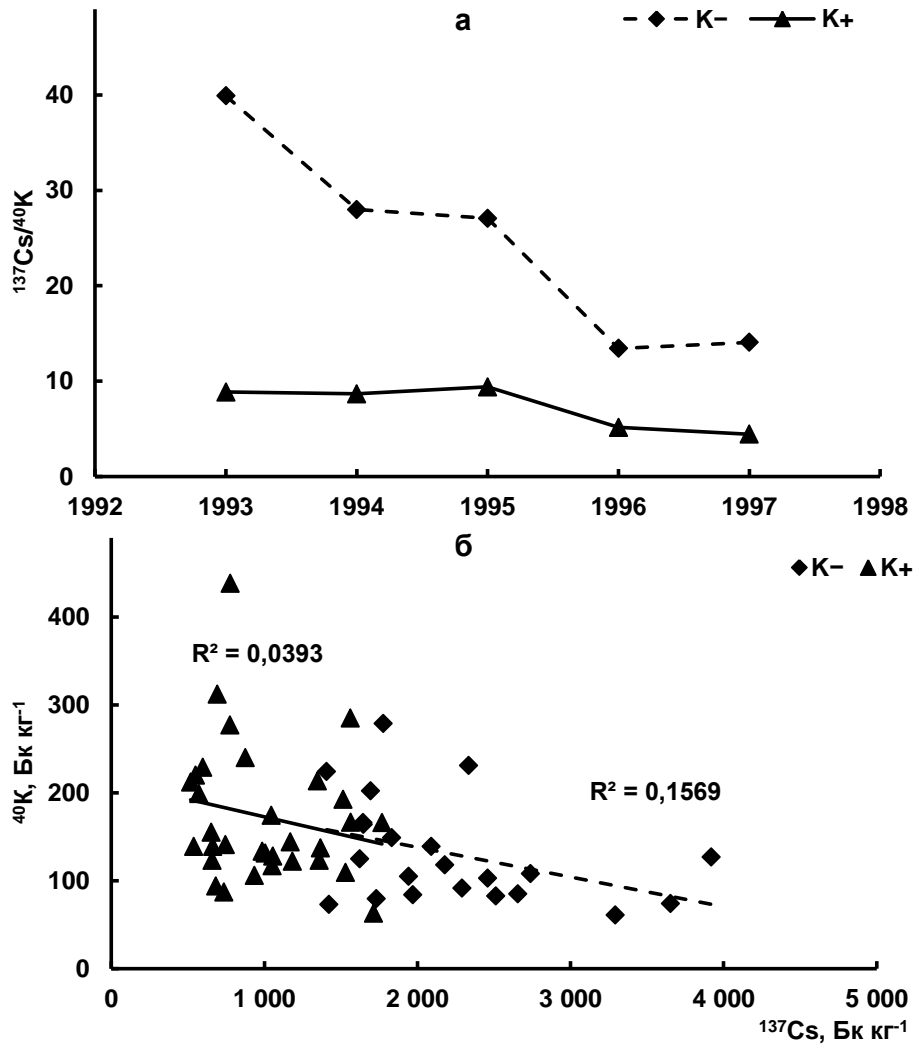


Рис. 3. Співвідношення активності $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ у рослинах брусниці (а) та залежність активності ^{137}Cs та ^{40}K (б).

ціях калію дискримінація цезію сильна. Крім того, відсутність кореляційних зв'язків між ^{137}Cs та ^{40}K (крім рослин чорниці) пояснюється очевидно і тим, що надходження цезію у рослини у міру підвищення концентрації калію у зовнішньому середовищі знижується, але дана залежність не є прямолінійною і може описуватися цілим рядом рівнянь (Shaw, Bell, 1991). На думку Zhu et al. (2000), зменшення надходження цезію в рослини внаслідок підвищених концентрацій калію у ґрунтового розчині частково пояснюється посиленням «витікання» цезію з коренів рослин.

Таким чином, одержані дані показують, що внесення калійних добрив у лісових екосистемах забезпечує більш ефективне звуження співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ у рослинах вересу звичайного, ніж у чорниці та брусниці. Співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ у вересу на дослідній ділянці (K+) було приблизно у п'ять разів вуж-

чим, ніж на контрольній (K-) ділянці, тоді як у чорниці та брусниці спостерігалось приблизно триразове звуження згаданого співвідношення. У рослинах вересу та брусниці будь-який зв'язок між ^{137}Cs та ^{40}K відсутній незалежно від удобрення, тоді як у чорниці величина активності концентрації ^{40}K тісно пов'язана з вмістом ^{137}Cs .

Автори висловлюють подяку професорам Шведського університету сільськогосподарських наук К. Йохансону та К. Розену. Проект було виконано за підтримки Шведського університету сільськогосподарських наук (SLU).

ЛІТЕРАТУРА

Johanson K.J., Kardell L. Radiocaesium in lingonberry, bilberry, cloudberry and cranberry in Sweden // J. Radioecol. – 1996. – V. 4. – P. 27-35.

- Johanson K.J., Bergström R. Radiocaesium transfer to man from moose and roe deer in Sweden // Sci. Total Environ. – 1994. – V. 157. – P. 309-316.
- Kaunisto S., Aro L., Rantavaara A. Effect of fertilization on the potassium and radiocaesium distribution in tree stands (*Pinus sylvestris* L.) and peat on a pine mire // Environ. Pollut. – 2002. – V. 117. – P. 111-119.
- Levula T., Saarsalmi A., Rantavaara A. Effects of ash fertilization and prescribed burning on macronutrient, heavy metal, sulphur and ^{137}Cs concentrations in lingonberries (*Vaccinium vitis-idaea*) // Forest Ecol. Manag. – 2000. – V. 126. – P. 269-279.
- Rosén K., Vinichuk M., Nikolova I., Johanson K. Long-term effects of single potassium fertilization on ^{137}Cs levels in plants and fungi in a boreal forest ecosystem // J. Environ. Radioact. – 2011. – V. 102. – P. 178-184.
- Rosén K., Vinichuk M., Johanson K. ^{137}Cs in a raised bog in central Sweden // J. Environ. Radioact. – 2009. – V. 100. – P. 534-539.
- Rosén K. Field studies on the behaviour of radiocaesium in agricultural environments after the Chernobyl accident. PhD-thesis, Swedish University of Agricultural Sciences. – Uppsala, 1996.
- Shaw G., Bell J. N. B. Competitive effects of potassium and ammonium on caesium uptake kinetics in wheat // J. Environ. Radioact. – 1991. – V. 13, № 4. – P. 283-296.
- Vinichuk M., Rosén K., Johanson K.J., Dahlberg A. Correlations between potassium, rubidium and cesium (^{133}Cs and ^{137}Cs) in sporocarps of *Suillus variegatus* in a Swedish boreal forest // J. Environ. Radioact. – 2011. – V. 102. – P. 386-392.
- Vinichuk M., Johanson K.J., Rydin H. et al. The distribution of ^{137}Cs , K, Rb and Cs in plants in a Sphagnum-dominated peatland in eastern central Sweden // J. Environ. Radioact. – 2010. – V. 101. – P. 170-176.
- WRB. World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports. – Rome, FAO, 2006. – V. 103. – 103 p.
- Zhu Y. G., Shaw G., Nisbet A. F. et al. Effects of external potassium supply on compartmentation and flux characteristics of radiocaesium in intact spring wheat roots // Ann. Bot. – 2000. – V. 85. – P. 293-298.
- Zhu Y.G., Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application // J. Exp. Bot. – 2000. – V. 51. – P. 1635-1645.

Надійшла до редакції
22.12.2010 p.

^{137}Cs AND ^{40}K IN PLANTS OF BOREAL FOREST ECOSYSTEMS: EFFECT OF POTASSIUM FERTILIZER APPLICATION

M. M. Vinichuk^{1,2}, I. Nikolova²

¹Zhytomyr State Technology University
(Zhitomir, Ukraine)

²Swedish Agricultural University
(Uppsala, Swedish)

Concentration ratios $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ in heather (*Calluna vulgaris* L.), bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) and lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) plants in boreal forest ecosystems of Central Sweden after potassium application were analyzed. The effect of potassium fertilizer application on concentration ratios $^{137}\text{Cs}/^{40}\text{K}$ and relationships between ^{137}Cs and ^{40}K when taken up by plants are shown.

Key words: *Calluna vulgaris*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, potassium, potassium fertilizer, radiocaesium

ВИНІЧУК, НИКОЛОВА

^{137}Cs И ^{40}K В РАСТЕНИЯХ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ: ЭФФЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ

М. М. Виничук^{1,2}, И. Николова²

¹*Житомирский государственный технологический университет
(Житомир, Украина)*

²*Шведский университет сельскохозяйственных наук
(Упсала, Швеция)*

Проведен сравнительный анализ соотношения активности радиоактивного цезия (^{137}Cs) и калия (^{40}K) в растениях вереска обыкновенного (*Calluna vulgaris* L.), черники (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) в бореальных лесных экосистемах Центральной Швеции после внесения калийных удобрений. Показано влияние применения калийных удобрений на соотношение изотопов калия и цезия у исследуемых растений и проанализированы зависимости между этими изотопами при их поглощении растениями.

Ключевые слова: *Calluna vulgaris, Vaccinium myrtillus, Vaccinium vitis-idaea, калий, калийные удобрения, радиоцезий*