

ДИНАМІКА НАКОПИЧЕННЯ ^{137}Cs ОКРЕМИМИ ВИДАМИ МАКРОМІЦЕТІВ І РОСЛИН БОРЕАЛЬНИХ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ

М. Вінічук*, І. Ніколова***

*Житомирський державний технологічний університет
вул. Черняхівського, 103, Житомир 10005, Україна

***Кафедра ґрунтів та навколишнього середовища

Шведський університет сільськогосподарських наук

PO Box 7014, SE-750 07, Унсала, Швеція

e-mail: Mykhailo.Vinichuk@slu.se

Досліджено динаміку зміни активності радіоцезію у плодкових тілах макроміцетів (хрящ-молочник гірчак – *Lactarius rufus* (Scop.) Fr.; масляк жовто-бурий – *Suillus variegatus* (Sw.) Kuntze; павутинник напівкривавий – *Cortinarius semisanguineus* (Fr.) Gillet; ковпак – (*Rozites caperata* (Pers.) P. Karst) і лісових рослин (верес звичайний – *Calluna vulgaris* (L.) Hull; чорниця – *Vaccinium myrtillus* L. та брусниця – *Vaccinium vitis-idaea* L.) в бореальних лісових екосистем центральної Швеції за 18-річний період.

Ключові слова: радіоцезій, гриби, верес звичайний, чорниця, брусниця.

Вміст радіоцезію (^{137}Cs) у рослинах і грибах у постчорнобильський період в бореальних лісових екосистемах у Скандинавії був досить високим, і в наступні 10–15 років зниження активності ^{137}Cs відбувалося повільно. У результаті радіоактивність м'яса диких тварин ще до недавнього часу залишалася порівняно високою [6]. Більше того, згідно з останніми дослідженнями, активність ^{137}Cs у окремих видах їстівних грибів за останні 20 років не тільки не зменшується, а навіть значно зростає (*Cantharellus* spp.) [4]. Поєднання високої концентрації ^{137}Cs у продуктах лісу, насамперед у грибах, і тривалого періоду ефективного екологічного напіврозпаду ^{137}Cs в лісових екосистемах може забезпечувати високі дозові навантаження у певних груп населення, зокрема через споживання ягід, грибів і м'яса диких тварин. Крім грибів, ^{137}Cs також активно накопичується у вересі звичайному (*Calluna vulgaris*), що належить до родини вересових (*Ericaceae*). Ця рослина накопичує радіоцезій більш активно, ніж інші судинні рослини – морошка (*Rubus chamaemorus*), бобівник трилистий (*Menyanthes trifoliata*) і журавлина (*Vaccinium oxycoccus* і *Vaccinium microcarpon*) [8, 13]. Рівні ^{137}Cs у тих видах грибів, які менш схильні до накопичення цього радіонукліду, подібні до тих, що спостерігаються, наприклад, у чорниці (*Vaccinium myrtillus*) або брусниці (*Vaccinium vitis-idaea*). Обидва види характеризуються достатньо високими рівнями накопичення радіоцезію і входять до складу раціону косулі та лося. Поряд із тим, більшість видів грибів можуть накопичувати в 10–100 разів більше радіоцезію, ніж судинні рослини, серед яких масляк жовто-бурий (*Suillus variegatus*) також характеризується порівняно високими рівнями накопичення ^{137}Cs після, напр., павутинника (*Cortinarius* spp) [14 Неопубліковані дані].

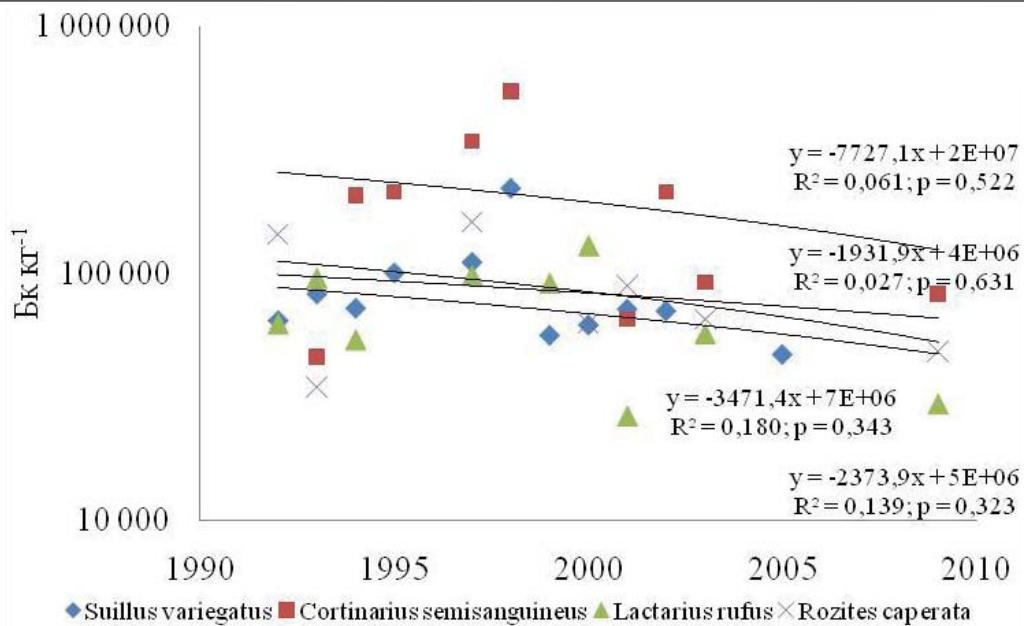
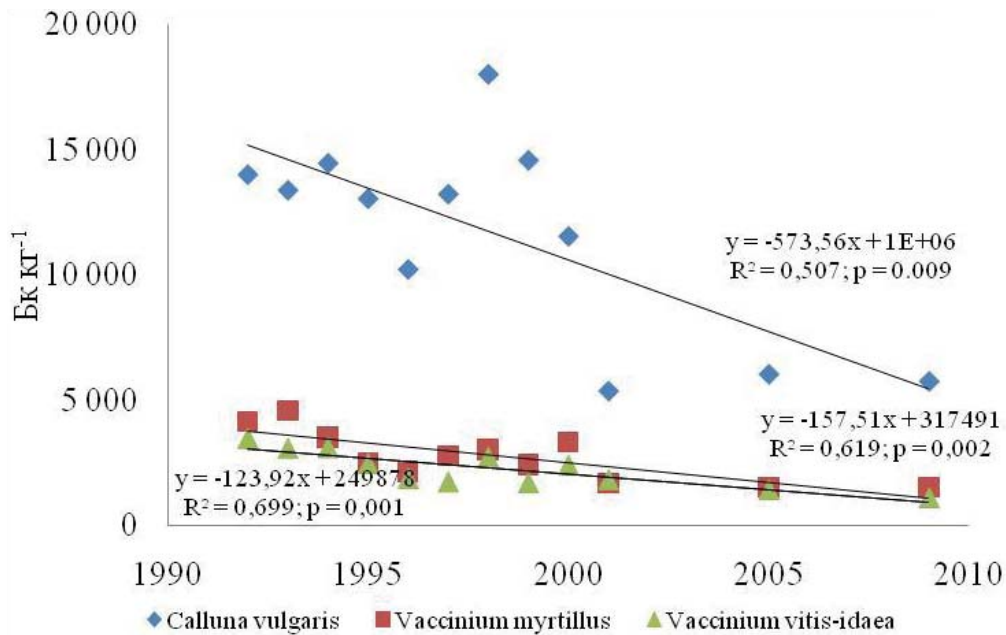
Метою цього дослідження було оцінити зміни активності радіоцезію у плодкових тілах грибів і судинних рослин в лісових екосистемах центральної Швеції за 18-річний період. Наша робоча гіпотеза полягала в тому, що зниження активності радіоцезію в рослинах з часом є більш помітним, ніж у плодкових тілах грибів.

Дослідження проводили в лісових екосистемах центральної Швеції (66°59'50" пн. ш; 15°73'60" сх. д.) в період з 1992 по 2009 рік. Рівень забруднення території за ^{137}Cs становить 33 ± 10 кБк м² [3]. Ґрунти району досліджень розвинені на піщаних гляціальних відкладеннях і за класифікацією ФАО/WRB характеризуються як Folie Leptosol та Haplic Podzol [15]. Вміст органічної речовини у верхньому органічному шарі ґрунту понад 70%, рН 3,4–3,7, обмінного калію від 480 (верхній органічний шар) до 35 (мінеральний горизонт) мг·кг⁻¹ ґрунту. У насадженнях переважає сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) та ялина європейська (*Picea abies*) з домішками листяних дерев, переважно берези (*Betula pendula* та *Betula pubescens*). У трав'янистому покриві переважають брусниця, чорниця та верес.

Для досліджень відбиралися надземні зелені частини рослин, зазвичай у серпні-вересні. 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 ^{137}Cs . Активність ^{137}Cs у плодівих тілах грибів вимірювали або у свіжих зразках із подальшим висушуванням при температурі 55°C до постійної маси та перерахунком на одиницю сухої маси, або у попередньо висушеному матеріалі. Вимірювання активності ^{137}Cs проводили на напівпровідникових германієвих детекторах у низькофоновій лабораторії Шведського університету сільськогосподарських наук. Час вимірювання забезпечував отримання статистичної похибки в діапазоні від 5 до 10%. Активність ^{137}Cs наведена у Бк·кг⁻¹ сухої маси з поправкою на дату відбору. Статистична обробка результатів проводилася з використанням Minitab (© 2007 Minitab Inc) програмного забезпечення.

Виявлено, що найбільш ефективно накопичує радіоцезій павутинник напівкривавий (*Cortinarius semisanguineus*). У середньому за роки досліджень активність ^{137}Cs для цього виду становила $200,4 \pm 114,9$ кБк·кг⁻¹ (45,8–544,9), тоді як середні значення активності плодівих тіл інших досліджуваних видів грибів не перевищували 90 кБк·кг⁻¹. Кореляційно-регресійний аналіз показує, що у хряща-молочника гірчака (*Lactarius rufus*) та ковпака (*Rozites caperata*) кореляційний зв'язок між активністю радіоцезію у їхніх плодівих тілах і часом (роками) є слабкий, значення коефіцієнта достовірності апроксимації (R^2) відповідно 0,14 та 0,18 (рис. 1). У інших двох видів – масляка жовто-бурого (*Suillus variegatus*) та павутинника напівкривавого (*Cortinarius semisanguineus*) – такий зв'язок практично відсутній. Значення коефіцієнтів кореляції становлять 0,03 та 0,06 відповідно. Для всіх досліджуваних видів грибів залежність між величиною активності й часом не є статистично достовірною ($p \geq 0,05$). Серед рослин найвищу здатність накопичувати ^{137}Cs виявлено у вересу звичайного (*Calluna vulgaris*). У середньому за роки досліджень активність ^{137}Cs у рослинах вересу становить 11,6 кБк кг⁻¹. Чорниця (*Vaccinium myrtillus*) та брусниця (*Vaccinium vitis-idaea*) характеризуються приблизно однаковою здатністю щодо накопичення радіонукліду – 2,3–2,8 кБк кг⁻¹ (в середньому за роки досліджень). Всі три види рослин показали істотне зниження рівня радіоцезію протягом років спостережень. Зв'язок між активністю радіоцезію у цих рослинах і часом (роками) сильний, значення коефіцієнтів достовірності апроксимації становлять 0,51, 0,62 і 0,70 для вересу, чорниці та брусниці відповідно (рис. 2).

У результаті дослідження 163 зразків плодівих тіл грибів і 190 зразків рослин встановлено, що гриби та рослини мають різну тенденцію щодо зниження рівнів накопичення ^{137}Cs з часом. У рослинах дана тенденція простежується більш чітко, тоді як у плодівих тілах грибів така залежність не встановлена. Однією з причин цього є значна варіація величин активності радіоцезію у грибах, тоді як у рослин варіації вмісту ^{137}Cs є значно меншими. Було показано [2], що для грибів коефіцієнти накопичення ^{137}Cs можуть від-

Рис. 1. ^{137}Cs у плодових тілах грибів, Бк·кг $^{-1}$.Рис. 2. ^{137}Cs у рослинах, Бк·кг $^{-1}$.

різнятися на декілька порядків як для різних видів, так і для одного й того ж виду. Так, активність ^{137}Cs у плодових тілах грибів, що належать до одного виду (*Suillus variegatus*), залежить від місця їх зростання (просторових відмінностей ґрунтових параметрів), неоднорідності радіоактивного забруднення та поширення міцелію у ґрунті [1]. Залежність рівнів активності ^{137}Cs у плодових тілах грибів від особливостей поширення міцелію в ґрунті була

показана в низці робіт [напр., 10]. Одержані нами дані є непрямим підтвердженням такої закономірності. У всіх без винятку видах досліджуваних грибів спостерігається певний максимум активності протягом 1996–1998 рр., який за абсолютною величиною приблизно удвічі перевищує усереднені значення вмісту ^{137}Cs у період як до 1996 р., так і після 1998 р. У рослин подібного піку активності практично не спостерігається, або він виражений значно слабше (верес звичайний). Найбільш імовірним поясненням даного піку активності (10–12 років після Чорнобильської аварії) є збіг максимумів активності радіонукліду в профілі ґрунту з локалізацією міцелію, оскільки, як відомо, вертикальна міграція радіоцезію у бідних на елементи живлення лісових ґрунтах є досить повільною [12], в тому числі й через участь у цьому процесі грибного міцелію. Встановлено, що міцелій грибів сприяє не лише низхідному, а й, насамперед, висхідному переміщенню радіонукліду в межах ґрунтового профілю [7]. У результаті значна частина радіонукліду тривалий час залишається в біологічному колообігу і є біологічно доступною для поглинання не лише грибами, а й іншими лісовими рослинами. Свідченням цьому є також те, що у плодкових тілах окремих видів грибів (напр. *Cantharellus* spp.) рівні ^{137}Cs в післячорнобильський період не тільки не зменшилися з часом, а навпаки – навіть показують чітку тенденцію до зростання [4]. Отже, дані цього дослідження щодо змін рівнів ^{137}Cs у грибах досить добре збігаються з результатами інших спостережень і підтверджують загальну тенденцію: зниження накопичення радіоцезію грибами відбувається досить повільно. Тому гриби все ще можуть бути додатковим джерелом опромінення як у результаті їхнього безпосереднього вживання, так і через м'ясо диких тварин.

Причину високої активності ^{137}Cs у рослинах вересу звичайного виявити складно, хоча присутність ерікоїдної мікоризи, яка сприяє накопиченню радіоцезію, зокрема, ^{134}Cs [11] та латеральний тип поширення кореневої системи переважно у верхніх шарах ґрунту [5] є найбільш вірогідними. З іншого боку, брусниця, рівні активності якої значно нижчі, та яка розмножується в тому числі й вегетативно за допомогою кореневища, інколи формує суцільну мережу, котра може поширюватися на відстані десятків метрів. Крім того, досліджувані види рослин мають тривалий період екологічного напіврозпаду для радіоактивного цезію. Для чорниці та брусниці він становить близько 11 років, а для вересу звичайного близько 9 років [9]. Загалом, верес, чорниця та брусниця, на відміну від грибів, показали чітку тенденцію до зниження рівня активності ^{137}Cs протягом періоду досліджень. 2–3-кратне зниження накопичення радіоцезію рослинами у 2009 р. порівняно з 1992 р. є також статистично достовірним ($p=0,001–0,009$).

Загалом, зниження рівнів радіоактивності ^{137}Cs як у грибах, так і в рослинах відбувається за рахунок двох основних процесів: унаслідок його біологічної іммобілізації (в тілах живих організмів, у тому числі ґрунтових мікроорганізмів) та фізико-хімічної (у ґрунті) фіксації, а також за рахунок міграції в рамках ґрунтового профілю за межі кореневмісного шару ґрунту (i); за рахунок його фізичного розпаду (ii). Дані наших досліджень показують, що згадані два процеси у лісових рослин є приблизно рівноцінними. Так, для рослин при загальному зниженні рівнів активності радіоцезію за період дослідження на 60–70% зниження активності за рахунок фізичного розпаду радіонукліду становить 34%, тобто близько половини. Для плодкових тіл грибів частка зниження активності за рахунок фізичного розпаду радіонукліду, очевидно, буде такою ж, тоді як зменшення його надходження у гриби чітко не простежується.

У результаті проведених досліджень встановлено, що в період з 1992 по 2009 р. активність ^{137}Cs у судинних рослинах (таких, як верес звичайний, чорниця та брусниця),

що ростуть у бореальних лісових екосистемах центральної Швеції, знизилася більш ніж удвічі. У плодових тілах хряща-молочника гірчака (*Lactarius rufus*), маслюка жовто-бурого (*Suillus variegatus*), павутинника напівкривавого (*Cortinarius semisanguineus*) та ковпака (*Rozites caperata*) зниження рівня ^{137}Cs менш помітне або взагалі не спостерігається.

Напрями подальших досліджень

Існує необхідність у вивченні механізмів, що забезпечують ефективну акумуляцію радіоцезію грибами протягом тривалого часу після випадіння радіоактивних опадів.

Автори висловлюють подяку професорам Шведського університету сільськогосподарських наук К. Йохансону та К. Розену, PhD. А. Далбергу та Т. Нільссон. Проект було виконано за підтримки гранта від SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co) та Шведського університету сільськогосподарських наук (SLU).

1. Dahlberg A., Nikolova I., Johanson K. J. Intraspecific variation in ^{137}Cs activity concentration in sporocarps of *Suillus variegatus* in seven Swedish populations // Mycol. Res. 1997. Vol. 101. P. 545–551.
2. Gillett A. G., Crout N. M. J. A review of ^{137}Cs transfer to fungi and consequences for modeling environmental transfer // J. Environ. Radioact. 2000. Vol. 48. P. 95–121.
3. Johanson K. J., Bergström R. Radiocaesium transfer to man from moose and roe deer in Sweden // Sci. Total Environ. 1994. Vol. 157. P. 309–316.
4. Mascanzoni D. Long-term transfer of ^{137}Cs from soil to mushrooms in a semi-natural environment // J. Radioanal. and Nuclear Chem. 2009. Vol. 282. P. 427–431. doi 10.1007/s10967-009-0191-7
5. Messier C., Kimmins J. P. Above- and below-ground vegetation recovery in recently clearcut and burned sites dominated by *Gaultheria shallon* in coastal British Columbia // Forest Ecol. Managm. 1991. Vol. 46. P. 275–294.
6. Palo R. T., White N., Danell K. Spatial and temporal variations of ^{137}Cs in moose *Alces alces* and transfer to man in northern Sweden // Wildlife Biol. 2003. Vol. 9. P. 207–212.
7. Rafferty B., Brennan M., Dawson D., Dowding D. Mechanisms of ^{137}Cs migration in coniferous forest soils // J. Environ. Radioact. 2000. Vol. 48. P. 131–143.
8. Rosén K., Vinichuk M., Johanson K. ^{137}Cs in a raised bog in central Sweden // J. Environ. Radioact. 2009. Vol. 100. P. 534–539 doi:10.1016/j.jenvrad.2009.03.005
9. 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. 2010. Article in press.
10. Rühm W., Kammerer L., Hiersche L., Wirth E. The $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ ratio in fungi as an indicator of the major mycelium location in forest soil // J. Environ. Radioact. 1997. Vol. 35. N 2. P. 129–148.
11. Strandberg M., Johansson M. ^{134}Cs in heather seed plants grown with and without mycorrhiza // J. Environ. Radioact. 1998. Vol. 40. N 2. 1. P. 175–184.
12. Vinichuk M. M., Johanson K. J. Accumulation of ^{137}Cs by fungal mycelium in forest ecosystems of Ukraine // J. Environ. Radioact. 2003. Vol. 64. P. 27–43.
13. Vinichuk M., Johanson K. J., Rydin H., Rosén K. The distribution of ^{137}Cs , K, Rb and Cs in plants in a *Sphagnum*-dominated peatland in eastern central Sweden // J. Environ. Radioact. 2010. Vol. 101. P. 170–176 doi:10.1016/j.jenvrad.2009.10.003
14. Vinichuk M., Rosén K., Johanson K. J., Dahlberg A. The role of fungi in uptake and biological retention of ^{137}Cs : a comparison between terrestrial ecosystems // Submitted to J. Environ. Radioact. 2010^a.

15. WRB. *World reference base for soil resources 2006*. World Soil Resources Reports 2006. Vol. 103. FAO, Rome, 103 pp.

Стаття: надійшла до редакції 06.12.10

доопрацьована 05.01.11

прийнята до друку 12.01.11

¹³⁷CS DYNAMICS IN SPOROCARPS OF MACROMYCETES AND PLANTS IN BOREAL FOREST ECOSYSTEMS

M. Vinichuk*, I. Nikolova***

**Department of Ecology, Zhytomyr State Technological University
103, Chernyakhivsky St., Zhytomyr 10005, Ukraine*

****Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences
SLU, Box 7014, SE-75007, Uppsala, Sweden
e-mail: Mykhailo.Vinichuk@slu.se*

The results of long-term changes in ¹³⁷Cs activity concentrations in fruit bodies of macromycetes fungi (*Lactarius rufus* (Scop.) Fr; *Suillus variegatus* (Sw.) Kuntze; *Cortinarius semisanguineus* (Fr) Gillet; *Rozites caperata* (Pers.) p. Karst) and forest plants (heather – *Calluna vulgaris* (L.) Hull; lingonberry – *Vaccinium vitis-idaea* L. and bilberry – *Vaccinium myrtillus* L.) in boreal forest ecosystems of Central Sweden are presented.

Key words: radiocaesium, fungi, heather, bilberry, lingonberry.

ДИНАМИКА ¹³⁷CS В ПЛОДОВЫХ ТЕЛАХ МАКРОМИЦЕТОВ И РАСТЕНИЙ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

М. Винчук*, И. Николова***

**Житомирский государственный технологический университет
ул. Черняховского, 103, Житомир 10005, Украина*

****Кафедра почв окружающей среды, Шведский университет
сельскохозяйственных наук
PO Box 7014, SE-750 07, Упсала, Швеция
e-mail: Mykhailo.Vinichuk@slu.se*

Представлены результаты исследований динамики изменений активности радиоцезия в плодовых телах макромицетов (горькушка – *Lactarius rufus* (Scop.) Fr.; маслёнок жёлто-бурый – *Suillus variegatus* (Sw.) Kuntze; паутинник кроваво-красный – *Cortinarius semisanguineus* (Fr.) Gillet; колпак кольчатый – *Rozites caperata* (Pers.) P. Karst) и лесных растений (вереск обыкновенный – *Calluna vulgaris* (L.) Hull; черника обыкновенная – *Vaccinium myrtillus* L. и брусника обыкновенная – *Vaccinium vitis-idaea* L.) в бореальных лесных экосистемах Центральной Швеции за 18-летний период.

Ключевые слова: радиоцезий, грибы, вереск обыкновенный, черника, брусника.