

ВПЛИВ ОДНОРАЗОВОГО ВНЕСЕННЯ КАЛІЙНИХ ДОБРИВ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ МІГРАЦІЇ РАДІОЦЕЗІЮ У ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ

М. Вінічук

*Житомирський державний технологічний університет
вул. Чуднівська, 103, Житомир 10005, Україна
e-mail: mykhailo59@gmail.com*

У статті узагальнені результати багаторічних досліджень щодо ефективності одноразового внесення калійних добрив як контрзаходу, спрямованого на зниження інтенсивності міграції радіоактивного цезію із ґрунту в рослини та гриби у бореальних лісових екосистемах центральної Швеції, що зазнали радіонуклідного забруднення після аварії на ЧАЕС у 1986 р. Показано, що в результаті здійснення цього заходу питома активність радіонукліду в чагарникових рослинах (верес, брусниця та чорниця), у плодових тілах низки видів найбільш поширених дикоростучих грибів (*Cortinarius*, *Lactarius*, *Rozites*, *Suillus*), а також у молодих пагонах сосни та ялини (хвоя та пагони одно-, дворічного і старшого віку) знижується більш ніж на 40 %. Встановлено, що залежно від видів рослин і грибів тривалість ефекту удобрення може коливатися від 8–9 до 18–20 років. Для чагарникових рослин і плодових тіл *Suillus variegatus*, що зростали на удобрюваній (K+) та контрольній (без удобрення) ділянках (K-) різниця величин питомої активності радіонукліду у більшості випадків є статистично достовірною ($p < 0,005$).

Ключові слова: брусниця, верес, лісові екосистеми, плодові тіла грибів, радіоцезій, сосна, чорниця, ялина

За час, що минув після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р., було запропоновано низку контрзаходів, спрямованих на зниження міграції радіонуклідів із ґрунту в рослини та тварини. Більшість із них стосувалися сільськогосподарських угідь і були спрямовані на виробництво радіаційно-безпечної сільськогосподарської продукції [2, 6]. Рівні забруднення лісових екосистем, порівняно з територіями, що не вкриті лісами, виявилися значно вищими. У результаті майже на 50 % території лісів України забруднення радіоцезієм (^{137}Cs) перевищувало 10 кБк/км² [1]. Оскільки даний радіонуклід переважно зосереджений у верхніх, багатих на органічну речовину шарах ґрунту й активно надходить через кореневу систему в лісову рослинність і плодові тіла грибів, концентрація його у продуктах лісу все ще залишається високою. Вживання лісових харчових продуктів, таких як гриби та ягоди, спричиняє додаткові дози внутрішнього опромінення населення. Крім людини, гриби та інші продукти лісу споживають також дикі тварини, зокрема, козулі та дикі кабани. У результаті високі рівні забруднення спостерігаються у особин, виявлених навіть у віддалених від Чорнобиля районах, а саме у Фінляндії, Швеції, Норвегії, Австрії та Італії [9]. Нині доза внутрішнього опромінення, яку отримує сільське населення Українського Полісся від харчових продуктів лісу, становить 35–50 % дози, отриманої від усіх продуктів харчування [3]. Тому проведення контрзаходів в умовах природних екосистем, забруднених радіонуклідами, залишається хоча і складним, проте актуальним завданням. Аналіз літературних джерел показує, що використання деревної золи, отриманої після спалювання кори дерев (сосна та ялина), яка залишається після розпилювання деревини, сприяло, з одного боку, помітному зростанню концентрації калію

в лісових рослинах, а з іншого – зменшенню у них вмісту ^{137}Cs , зокрема, у ягодах брусниці [7]. Дво-п'ятикратне зниження інтенсивності переходу ^{137}Cs із лісового ґрунту в рослини папороті й ожини спостерігали на 11-й рік після внесення 2,5 т вапна (містить $\approx 5\%$ калію) у ялиновому лісі на півдні Німеччини [12]. Як короткострокові (5 років), так і довгострокові (20 років) ефекти зниження переходу радіоцезію із ґрунту у хвою сосни звичайної за умов використання калійних добрив спостерігали в лісових екосистемах у західній частині Фінляндії [5]. Ефект калійного удобрення на зменшення переходу радіоцезію із ґрунту в рослини та гриби бореальних лісових екосистем шляхом одноразового внесення калійних добрив показано в одній із наших попередніх робіт [10]. Мета цієї статті – доповнити наявні дані та проаналізувати, наскільки тривалим може бути подібний ефект.

Матеріали та методи

Дослідження проводили у лісових екосистемах центральної Швеції, що зазнали радіонуклідного забруднення (щільність забруднення у 1986 р. становила ≈ 40 кБк/м²). У складі деревостанів переважали сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.) та ялина європейська (*Picea abies* L.) з наявністю берези пониклої (*Betula pendula* Roth.) та пухнастої (*Betula pubescens* Ehrh.). У надґрунтовому покриві переважали верес (*Calluna vulgaris* L. Hill.), брусниця (*Vaccinium vitis-idaea* L.) та чорниця (*Vaccinium myrtillus* L.). Калійні добрива (калійна сіль, KCl) вносили одноразово (червень 1992 р.) шляхом розкидання по поверхні ґрунту з використанням розкидача з розрахунку 100 кг/га діючої речовини калію. Після удобрення періодично, впродовж 20 років (1992–2013) відбирали зразки рослин, що зростали як на удобрюваній (K⁺), так і на контрольній (без удобрення) ділянках (K⁻). Питому активність ^{137}Cs визначали у рослинах вересу, брусниці та чорниці. У деревних порід аналізували молоді пагони сосни і ялини. Також відбирали й аналізували плодові тіла таких найпоширеніших видів грибів як хрящ-молочник гірчак (*Lactarius rufus* (Scop.) Fr., моховик жовто-бурий (*Suillus variegatus* (Sw.) Kuntze, ковпак (*Rozites caperata* (Pers. ex Fr.) Karst. і павутинник напівкривавий (*Cortinarius semisanguineus* (Fr.) Gillet). Зразки чагарникових рослин і плодових тіл грибів аналізували протягом трьох періодів спостережень: перший період – з 1992-го по 2000 (1) – щорічно, другий період – з 2000 (1) по 2009 – з інтервалом у 4 роки, і третій період – у 2011 і 2013 році. Зразки пагонів сосни і ялини відбирали у 2011 та 2013 роках, хвою й пагони (однорічного, дворічного і старшого віку) аналізували окремо для верхньої, середньої та нижньої частин крони. Питому активність радіоцезію визначали на суху вагу (с.в.) зразків.

Результати і їхнє обговорення

Щільність забруднення ґрунту за радіоцезієм у районі проведення досліджень становила у 1986 р. 35–40 кБк/м², а у 1994 ≈ 33 кБк/м² [10]. У 2011 р. питома активність ґрунту до глибини 30–32 см варіювала в даному районі у межах від 120 до 1850 Бк/кг і в середньому становила ≈ 800 Бк/кг сухої ваги ґрунту.

У рослинах вересу концентрація радіонукліду виявилась у 4–5 разів вищою порівняно з питомою активністю його у рослинах чорниці та брусниці (рис. 1, а). Протягом перших 8-ми років (1992–2000) після одноразового внесення калійного добрива рослини вересу (наземна частина) контрольного (K⁻) варіанта містили у середньому майже утричі більше ($13,6 \pm 2,2$ кБк/кг) радіонукліду, ніж рослини з удобреної (K⁺) ділянки – $4,6 \pm 1,7$ кБк/кг. Даний ефект удобрення виявився найбільш помітним з-поміж інших досліджуваних видів і статистично значущим при рівні значущості 1 та 0,1 % [10]. У подальші роки (2001–2009) різниця між величинами активності радіоцезію в рослинах із ділянок K⁻ та K⁺ зменшилась – $5,7 \pm 0,34$ та $4,4 \pm 0,55$ кБк/кг відповідно. У 2011 р. рослини варіанта K⁻ все

ще мали трохи вищу активність радіонукліду ($4,1 \pm 0,09$ кБк/кг), ніж рослини варіанта K+ ($3,2 \pm 0,07$ кБк/кг). Отже, одноразове внесення калійних добрив дає змогу знизити рівень питомої активності ^{137}Cs у рослинах вересу в середньому на 50 % (від 17 до 76 %) упродовж 20 років (табл. 1). У рослин брусниці загалом ефект удобрення виявився трохи нижчим порівняно з рослинами вересу, та все ж досить помітним (рис. 1, б).

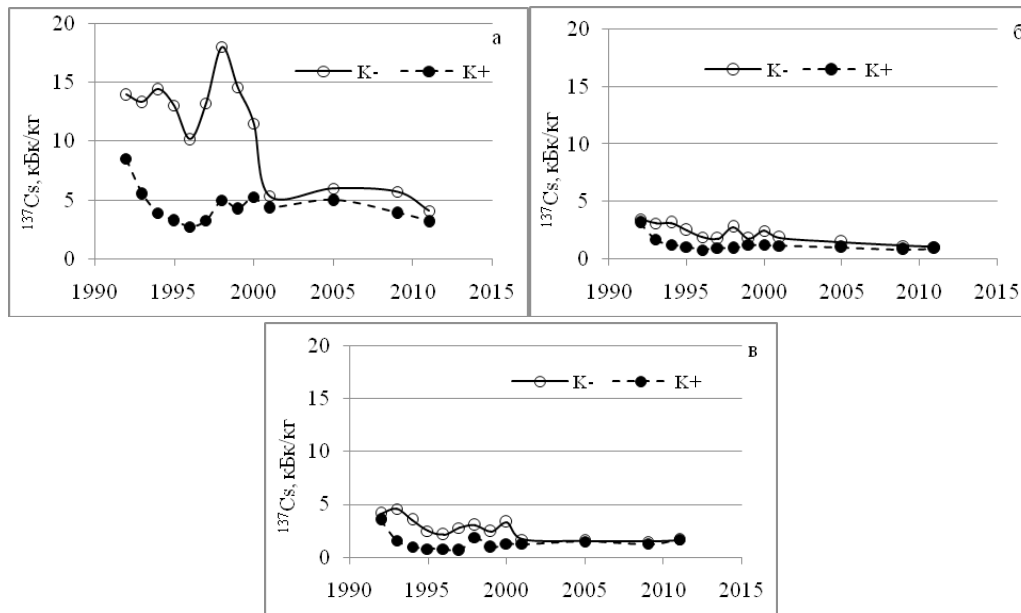


Рис. 1. Питома активність ^{137}Cs у рослинах: а – вересу звичайного (*Calluna vulgaris* L. Hill.); б – брусниці звичайної (*Vaccinium vitis-idaea* L.) та в – чорниці звичайної (*Vaccinium myrtillus* L.) у варіанті з одноразовим внесенням калійних добрив (K+) і на контролі (без удобрення, K-), кБк/кг с.в.

Так, найбільший ефект від удобрення ґрунту калійними добривами також спостерігали протягом перших 9-ти (1993–2001) років – питома активність радіоцезію становила відповідно $2,3 \pm 0,56$ та $1,1 \pm 0,29$ кБк/кг у рослин ділянки K- та K+. У період з 2005 по 2009 рр. концентрація радіонукліду у рослин контрольного та дослідного варіантів виявилася на рівні $1,28 \pm 0,24$ та $0,88 \pm 0,12$ кБк/кг, а у 2011 р. – на рівні $1,03 \pm 0,02$ та $0,89 \pm 0,05$ відповідно. У переважній більшості років спостережень різниця між питомою активністю радіонукліду в рослин з удобреної ділянки виявилася статистично значущою при рівнях значущості 5, 1 та 0,1 %. У середньому рослини брусниці дослідного варіанта містили \approx на 40 % (від 10 до 67 %) менше радіонукліду, ніж рослини на контролі (табл. 1).

Аналогічну закономірність спостерігали також у рослин чорниці. Протягом усіх років спостережень, за винятком останнього, рослини чорниці з удобреної ділянки мали помітно нижчий вміст радіонукліду, ніж рослини контрольного варіанта (рис. 1, в). Протягом перших 8-ми (1993–2000) років ефект від удобрення виявився найвищим – $3,0 \pm 0,77$ та $1,1 \pm 0,43$ кБк/кг відповідно у рослин на K- та K+ ділянках. У період з 2001-го по 2009-й роки ефект від удобрення помітно знизився – $1,6 \pm 0,09$ та $1,3 \pm 0,14$ кБк/кг, а у 2011 р. величина питомої активності рослин ділянки K- практично не відрізнялася від рослин ділянки K+ – $1,7 \pm 0,14$ та $1,6 \pm 0,16$ кБк/кг відповідно. У більшості випадків ефект від удобрення є статистично значущий при рівнях 5, 1 та 0,1 %. Результати показують, що в середньому у

рослинах чорниці за рахунок одноразового внесення калійних добрив можна забезпечити зниження рівня питомої активності ^{137}Cs на $\approx 40\%$ (табл. 1).

Вплив удобрення на рівень забруднення плодів грибів виявився неоднозначним, насамперед унаслідок значного варіювання значень їхньої питомої активності, навіть у межах одного й того ж виду. Інша складність полягала в тому, що не всі з досліджуваних видів грибів траплялися на обох ділянках, а це ускладнювало встановлення ефекту удобрення.

У плодівих тілах *Suillus variegatus* ефект удобрення спостерігали протягом 8-ми з 11-ти (1992–2009) років – $76,4 \pm 21,2$ та $34,1 \pm 18,8$ кБк/кг відповідно на варіантах К– та К+. У 3-х випадках (протягом 1992-го, 1998-го та 2000-го років), навпаки, у плодівих тілах на ділянці К– вміст радіоцезію виявився нижчим, ніж на ділянці К+. Протягом останніх років досліджень (2011 та 2013) цей вид траплявся лише у 2011 р. на ділянці К– (рис. 2, а). У період з 1992-го по 1997-й роки ефект удобрення для плодівих тіл *Suillus variegatus* виявився статистично значущий при рівнях 5 і 1 % протягом 4-х років, а протягом інших років досліджень – ні.

У плодівих тілах *Cortinarius semisanguineus* упродовж перших 6-ти років спостережень з 10-ти (1993–2009) вміст радіонукліду в середньому на варіанті без удобрення виявився удвічі вищим, ніж на удобряній ділянці – $266,9 \pm 229,8$ та $143,4 \pm 195,9$ кБк/кг відповідно (рис. 2, б).

Протягом 2-х років досліджень результат виявився протилежним – плоді тіла грибів на ділянці К+ мали трохи вищу активність ^{137}Cs , ніж ті, що зростали на контролі (К–). У інші роки дослідження плоді тіла даного виду не траплялися, тому не аналізувалися. Ймовірно, саме тому ефект удобрення для цього виду не є статистично значущим.

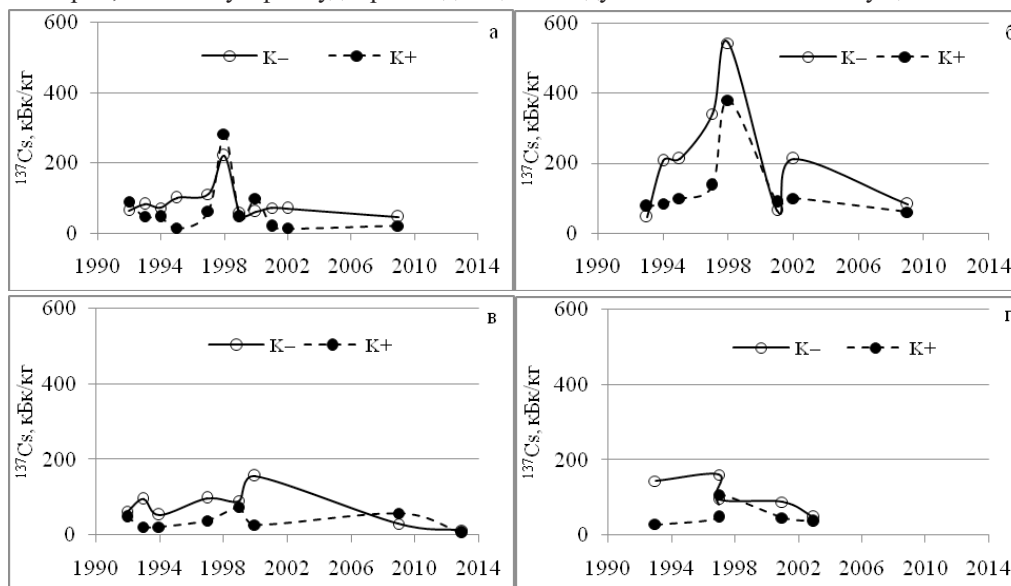


Рис. 2. Питома активність ^{137}Cs у плодівих тілах грибів: а – моховик жовто-бурий (*Suillus variegatus* (Sw.) Kuntze; б – павутинник напівкривавий (*Cortinarius semisanguineus* (Fr.) Gillet); в – гірчак (*Lactarius rufus* (Scop.) Fr., г – ковпак (*Rozites caperata* (Pers. ex Fr.) Karst. у варіанті з одноразовим внесенням калійних добрив (К+) та на контролі (без удобрення, К–), кБк/кг с.в.

У плодівих тілах *Lactarius rufus* помітний позитивний ефект удобрення також спостерігали протягом перших 6-ти років – $93,3 \pm 40,7$ та $31,2 \pm 11,4$ кБк/кг відповідно на ділянці

K- та K+ (рис. 2, е). У 2009 р., навпаки, плодові тіла контрольної ділянки мали майже удвічі нижчу питому активність ^{137}Cs порівняно з тими, що зростали на удобреній. У 2011 р. плодові тіла цього виду траплялися лише на ділянці K-, тоді як у 2013 р. знову спостерігали ефект удобрення для цього виду: питома активність радіонукліду у плодових тілах на контролі майже удвічі перевищувала питому активність ^{137}Cs плодових тіл дослідного варіанта – $12,3 \pm 1,2$ та $5,8 \pm 0,28$ кБк/кг відповідно. Статистично значущий ефект удобрення ($p < 0,05$) для даного виду спостерігали тільки у 1994 р.

У плодових тілах *Rozites caperata* (рис. 2, г) ефект удобрення спостерігали протягом 4-х років з 5-ти (1993–2003) років досліджень – $110,4 \pm 51,7$ та $39,9 \pm 8,8$ кБк/кг відповідно на ділянках K- та K+. У інші роки не спостерігали ефекту удобрення через відсутність плодових тіл цього гриба на досліджуваних ділянках. Окремі види грибів відбирали й аналізували тільки впродовж останніх (2011 та 2013) років досліджень. Серед них – хрящ-молочник неїстівний (*Lactarius helvius* (Fr.) Fr.), у плодових тілах якого питома активність радіоцезію на ділянці K- виявилась нижчою, ніж на ділянці K+ – $29,1 \pm 18,7$ та $36,6 \pm 6,3$ кБк/кг відповідно, що може свідчити про відсутність ефекту удобрення для цього виду гриба. Натомість, у плодових тіл іншого виду – сирійжка болотяна (*Russula paludosa* Britzelm), навпаки, вміст радіоцезію на ділянці K- виявився трохи вищим, ніж на ділянці K+ – $9,3 \pm 3,3$ та $7,2 \pm 3,4$ кБк/кг відповідно. Загалом ефект зниження питомої активності радіоцезію у плодових тілах грибів унаслідок калійного удобрення менш виражений, ніж у судинних рослинах.

Ефект калійного удобрення також спостерігали у молодих (одно-, дворічного і старшого віку) пагонах сосни та ялини (рис. 3).

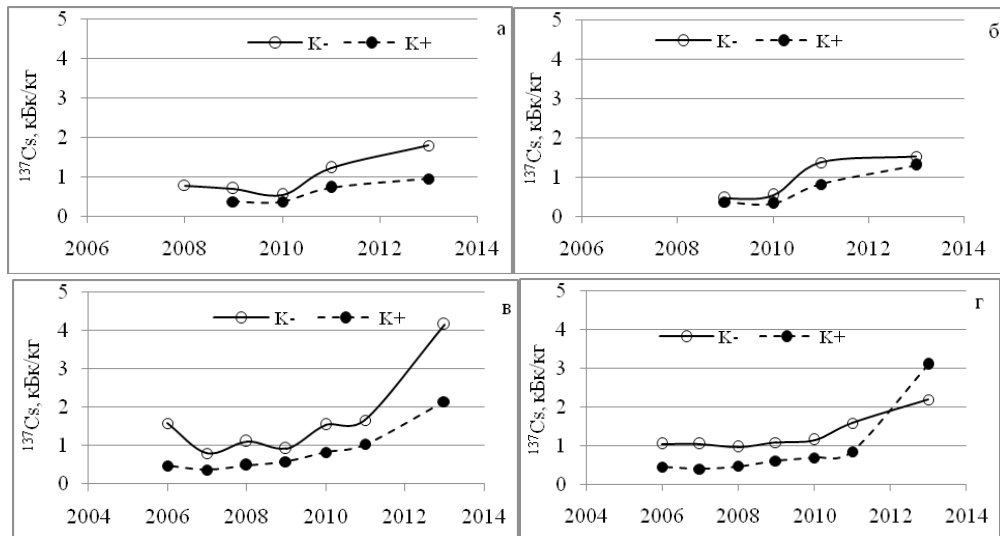


Рис. 3. Питома активність ^{137}Cs у гілках (а) та хвої (б) сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) і у гілках (в) та хвої (г) ялини європейської (*Picea abies* L.) у варіанті з одноразовим внесенням калійних добрив (K+) і на контролі (без удобрення, K-), кБк/кг с.в.

Так, гілки та хвоя сосни 2013-го, 2012-го, 2011-го та старшого віку на ділянці K- у середньому містили майже у 1,5–2 рази більше радіонукліду, ніж гілки з ділянки K+ (рис. 3, а, б). Ефект одноразового внесення калійних добрив виявився довготривалим, оскільки забезпечував у середньому 30–40 % зниження питомої активності радіонукліду в гілках і хвої сосни різного віку через 20 років. Результативним встановлено удобрення також у ялини – в гілках і хвої на ділянці K- у середньому питома активність радіоцезію виявилася

на 40–50 % вищою, ніж на ділянці K+, за винятком останнього (2013) року спостереження (табл. 1).

Таблиця 1

Усереднені дані ефективності одноразового внесення калійних добрив за роки спостережень, %

Види	Роки спостережень	Різниця між K– та K+, %
Чагарникові рослини		
Брусниця	1992–2011	42,1
Верес	1992–2011	52,4
Чорниця	1992–2011	43,0
Гриби		
Ковпак	1993–2003	41,8
Моховик жовто-бурий	1992–2009	27,5
Павутинник напівкривавий	1993–2009	22,3
Хряц-молочник гірчак	1992–2013	34,9
Дерева		
Сосна:		
пагони	2008–2013	41,2
хвоя	2008–2013	27,9
Ялина:		
пагони	2006–2013	50,0
хвоя	2006–2013	36,8

Отримані дані досить добре узгоджуються з результатами інших досліджень [5, 7, 9, 12]. Причини довготривалого результату одноразового внесення калійних добрив у лісових екосистемах не зовсім зрозумілі, але можна припустити, що у ґрунті можуть мати місце конкурентні відносини між іонами цезію та калію як хімічними аналогами. До тих пір, поки у ґрунті наявний у доступній для рослин формі калій, рослини, ймовірно, поглинатимуть його у більших кількостях, що, у свою чергу, призведе до зниження у них концентрації ^{137}Cs . Поступове зниження ефекту удобрення може бути пов'язане з тим, що з часом наявний у ґрунті калій дедалі більше залучається у біологічний колообіг і акумулюється у рослинах.

Очевидно, значний вплив калійного удобрення на зменшення переходу радіоцезію з ґрунту в рослини може бути пояснений також зазвичай низьким рівнем забезпеченості калієм ґрунтів бореальних лісових екосистем. Важливу роль у колообігу поживних речовин у цих лісах відіграють мікоризні гриби. Вважається, що в бореальних лісових екосистемах основні потоки поживних речовин проходять переважно саме через гриби (як сапротрофи, так і мікоризні), рослини та лісову підстилку, в той час як обмін мінеральними речовинами через ґрунтове середовище є менш важливим для живлення рослин [8].

Отже, одноразове внесення калійних добрив у бореальних лісових екосистемах може забезпечувати помітне (до 40 % і більше) зниження переходу радіонуклідів з ґрунту в чагарникові рослини, такі як верес, брусниця та чорниця, у плоді тіла низки видів дикоростучих грибів, таких як *Lactarius*, *Suillus*, *Rozites* та *Cortinarius*, а також у молоді пагони (хвоя та пагони одно-, дворічного і старшого віку) сосни та ялини. Тривалість такого ефекту може коливатися від 8–9 до 18–20 років. Для чагарникових рослин і плодівих тіл *Suillus variegatus* різниця між варіантами K– та K+ у більшості випадків є статистично достовірною ($p < 0,005$).

Робота виконана на кафедрі ґрунтів і навколишнього середовища Шведського університету сільськогосподарських наук. Автор висловлює подяку Шведському університетові сільськогосподарських наук та Житомирському державному технологічному університетові за фінансову підтримку цього проекту. Автор також вдячний професорові Karl J. Johanson, докторові Ivanka Nikolova за цінні поради та допомогу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Израэль Ю. А., Матвиенко И. И., Табачный Л. Я. и др. Загрязнение окружающей среды вследствие Чернобыльской аварии // Пятнадцать років Чернобыльської катастрофи. Досвід подолання. Київ, 2001. С. 80–95.
2. Пристер Б. С. Последствия аварии на Чернобыльской АЭС для сельского хозяйства Украины. К., 1999, 103 с.
3. Фурдичко О. І. Радіоекологічна безпека аграрних і лісових екосистем у віддалений період після аварії на ЧАЕС // Агроєкологічний журнал. 2016. № 1. С. 6–13.
4. Чоботько Г. М., Райчук Л. А., Пісковий Ю. М., Ясковець І. І. Формування дози внутрішнього опромінення населення Українського Полісся внаслідок споживання харчових продуктів лісового походження // Агроєкологічний журнал. 2011. № 1. С. 37–42.
5. Aro L., Rantavaara A. Long-term effect of fertilization on ^{137}Cs concentration in Scots pine needles // Radioprotection. 2011. Vol. 46. N 6. P. 479–482.
6. Deville-Cavelin G., Alexakhin R. M., Bogdevitch I. M. et al. Fifteen years after the Chernobyl accident. Lessons learned. Kyiv, 2001. P. 118–128.
7. 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. Managem. 2000. Vol. 126. P. 269–279.
8. Lindahl B. O., Taylor A. S. F., Finlay R. Defining nutritional constraints on carbon cycling in boreal forests – toward a less “phytcentric” perspective // Plant and Soil. 2002. Vol. 242. P. 123–135.
9. Møller A. P., Mousseau T. A. Assessing effects of radiation on abundance of mammals and predator–prey interactions in Chernobyl using tracks in the snow // Ecol. Indic. 2013. N 26. P. 112–116.
10. Rosén K., Vinichuk M., Nikolova I., Johanson K. Long-term effect of a single potassium fertilization on ^{137}Cs levels in plants and fungi in a boreal forest ecosystem // J. Environ. Radioact. 2011. Vol. 102. N 2. P. 178–184.
11. Strandberg M., Johansson M. ^{134}Cs in heather seed plants grown with and without mycorrhiza // J. Environ. Radioact. 1998. N 40. P. 175–184.
12. Zibold G., Klemt E., Konopleva I., Konoplev A. Influence of fertilizing on the ^{137}Cs soil–plant transfer in a spruce forest of Southern Germany // J. Environ. Radioact. 2009. Vol. 100. P. 489–496.

Стаття: надійшла до редакції 16.03.17

доопрацьована 28.04.17

прийнята до друку 16.05.17

EFFECT OF SINGLE POTASSIUM FERTILIZERS APPLICATION ON RADIOCAESIUM MIGRATION IN FOREST ECOSYSTEMS

M. Vinichuk

*Zhytomyr State Technological University
103, Chudnivska St., Zhytomyr 10005, Ukraine
e-mail: mykhailo59@gmail.com*

The results of long-term studies on the efficiency of a single application of potassium fertilizers as a countermeasure aimed at reducing the radiocesium uptake by forest plants and fungi in contaminated boreal forest ecosystems of central Sweden are presented and summarized. It is shown that the implementation of this countermeasure decreases radionuclide uptake by low-growing perennial shrubs (heather, lingonberry and blueberry), the fruit bodies of several commonly occurring species of wild fungi (*Cortinarius*, *Lactarius*, *Suillus* and *Rozites*), as well as young shoots of pine and spruce (needles and branches of one-, two-year and older) at least by 40 % or more. Fertilization effect depends on the types of plants and fungi and may be long lasting from 8–9 to 18–20 years. The difference in activity concentration of radiocesium in low-growing perennial shrubs and fruit bodies of *Suillus variegatus* grown on fertilized (K+) and unfertilized (control) areas (K-) in most cases is found to be statistically significant ($p < 0.005$).

Keywords: blueberry, heather, forest ecosystems, fruiting bodies of fungi, lingonberry, pine, radiocesium, spruce