

## БІОАКУМУЛЯЦІЯ ЛУЖНИХ, ЛУЖНОЗЕМЕЛЬНИХ МЕТАЛІВ І ОКРЕМИХ АКТИНОЇДІВ У МІЦЕЛІІ ТА ПЛОДОВИХ ТІЛАХ ЕКТОМІКОРИЗНИХ ГРИБІВ

М. Вінічук

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

У статті узагальнено результати кількісної оцінки вмісту лужних і лужноземельних металів, а також окремих актиноїдів у вільноростучому міцелії ектомікоризних грибів верхніх (0–10 см) шарів ґрунту бореальних лісових екосистем Швеції. Досліджено та порівняно вміст цих елементів у загальній масі ґрунту, ризоплані, ризосфері та плодових тілах грибів. У згаданих фракціях було досліджено вміст і дано порівняльну оцінку калію (K), рубідію (Rb), стабільного цезію ( $^{133}\text{Cs}$ ), радіоактивного цезію ( $^{137}\text{Cs}$ ), кальцію (Ca), стронцію (Sr), а також торію (Th) та урану (U). Показано, що у грибниці може бути локалізовано до 50 % (у середньому  $\approx 15$  %) радіонукліду від загального його вмісту в даному шарі ґрунту. Плодові тіла грибів містять приблизно на порядок меншу частку радіонукліду – не більше 0,12 % від загальної кількості радіоцезію, зосередженого у надземній фітомасі лісових рослин. Крім радіоактивного цезію, всі три лужні метали – K, Rb та  $^{133}\text{Cs}$  також активно накопичуються як міцелієм грибів, так і їхніми плодовими тілами. Концентрація калію в міцелії грибів у 4–5, а у плодових тілах  $\approx$  у 70 разів перевищує вміст цього елемента в загальній масі ґрунту – едафосфері. Вміст рубідію у міцелії грибів перевищує його вміст у ґрунті у 3,5 разу, а у їхніх плодових тілах – майже у 70 разів. Концентрація стабільного цезію у міцелії грибів та їхніх плодових тілах перевищує його вміст в едафосфері майже у 3 та 20 разів відповідно. У той же час гриби не накопичують лужноземельні метали Ca і Sr – у міцелії грибів та едафосфері концентрація цих елементів приблизно однакова. Концентрація актиноїдів (Th та U) у міцелії грибів є помітно нижчою, ніж в едафосфері. Встановлено, що у міцелії грибів може бути зосереджено від  $\approx 2$  % (Th) до  $\approx 27$  % (K) від загального вмісту елемента у верхньому (0–10 см) шарі лісового ґрунту.

*Ключові слова:* едафосфера, міцелій, метали, плодові тіла, ризоплана, ризосфера

У радіоактивного цезію ( $^{137}\text{Cs}$ ), що потрапив у навколишнє середовище внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р., уже відбувся період напіврозпаду. Разом з тим,  $^{137}\text{Cs}$ , що надійшов у довкілля після аварії та АЕС Фукусіма у 2011 р., все ще залишається одним із критичних продуктів поділу. Міграція радіоцезію в лісових екосистемах істотно відрізняється від його поведінки в інших екосистемах, насамперед через велику кількість грибного міцелію у верхніх, багатих на органічну речовину горизонтах ґрунту [13]. У ґрунтах бореальних лісових екосистем гриби є домінуючим компонентом біомаси мікроорганізмів, а міцелій як сапротрофних, так і мікоризних видів відіграє важливу роль і в руйнуванні органічної речовини, і у процесах мінерального живлення рослин через густу мережу симбіотичних мікоризних асоціацій [10]. Екзоферменти, що виділяються грибним міцелієм, сприяють вивільненню елементів живлення з органічних субстратів, у результаті чого як міцелій, так і плодові тіла грибів здатні накопичувати значну кількість як есенціальних макроелементів, так і тих стабільних і радіоактивних природних ізотопів,

які, будучи антропогенними забруднювачами, можуть за підвищених концентрацій бути токсичними для людини [12]. Особлива роль належить грибам у процесах міграції радіоактивного цезію у ґрунтах лісових екосистем [13].

Незважаючи на важливість радіоекологічних функцій грибів у лісових системах [1, 13], причини та механізми, що пояснювали би високі концентрації цього радіонукліду у грибах, порівняно з рослинами, залишаються недостатньо вивченими. Крім радіоцезію, гриби також ефективно накопичують у своїх плодових тілах лужні елементи: калій (K), рубідій (Rb) і стабільний цезій ( $^{133}\text{Cs}$ ) [5, 8]. Показано, що вміст цезію як радіоактивного ( $^{137}\text{Cs}$ ), так і стабільного ( $^{133}\text{Cs}$ ), а також Rb у плодових тілах грибів може на порядок перевищувати вміст цих елементів у рослинах, що зростають у тих же біотопах [15].

Плодові тіла грибів здатні акумулювати у значних кількостях як радіонукліди, зокрема, радіоактивний цезій, так і інші стабільні ізотопи. На сьогодні опубліковано цілу низку досліджень, у яких показано, як ті чи інші види грибів, зокрема, їхні плодові тіла, накопичують і радіонукліди, й інші елементи [3]. Проте плодове тіло ектомікоризних грибів – це лише порівняно невелика ( $\approx 5\%$ ) частина тіла окремого організму, яку можна побачити під час грибного сезону, тоді як основна частина грибною біомаси, грибний міцелій, міститься нижче поверхні ґрунту [9].

Експериментальні дані щодо здатності міцелію грибів накопичувати ті чи інші елементи, у тому числі радіоізотопи, досить обмежені. На сьогодні відомі лише окремі роботи, у яких були намагання на основі експериментальних досліджень, проведених у природних умовах, дати кількісну оцінку акумуляційної здатності грибною міцелію щодо радіоактивних і стабільних ізотопів [4, 12]. Важливою є роль окремих ґрунтових фракцій, таких як ризосфера та ризоплана, які можуть розглядатись як окремі ланки у трофічних взаємозв'язках, зокрема, для ектомікоризних грибів. Хоча оцінити величину біомаси міцелію ґрунту надзвичайно складно, деякі оцінки все ж є [9, 13], що дає змогу визначити, яка кількість того чи іншого елемента може бути зосереджена у грибах, зокрема, у міцелії.

Метою даної роботи є узагальнення відомостей про вміст радіоцезію, лужних і лужноземельних металів, а також окремих актиноїдів у міцелії ектомікоризних грибів, як фактора, що великою мірою визначає рівень цих елементів у верхніх, багатих на органічну речовину шарах лісового ґрунту. У розрахунках було використано отримані нами оцінки біомаси міцелію у верхніх (0–10 см) шарах досліджуваних лісових ґрунтів [13].

#### Матеріали і методи

Дослідження проводили у лісових екосистемах центральної Швеції, на глинисто-піщаних ґрунтах. Переважними видами у 80–100-річних деревостанах є ялина європейська (*Picea abies* (L.) Н. Karst.) та сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.) а у трав'янистому покриві здебільшого трапляються чорниця (*Vaccinium myrtillus* L.), орляк звичайний (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn), підбіл звичайний (*Tussilago farfara* L.), хвощ лісовий (*Equisetum silvaticum* L.). Зразки ґрунту і плодові тіла грибів відбирали протягом вересня–листопада з десяти ділянок (близько 10 м<sup>2</sup> кожна), розміщених на відстані 20–50 м одна від одної із загальної площі близько 2,0 га. У межах кожної ділянки за допомогою циліндричного бура (5,7 см у діаметрі) відбирали 4 зразки ґрунту до глибини 10 см навколо та безпосередньо у місцях зростання плодових тіл грибів ( $\approx 0,5$  м<sup>2</sup>). Там же відбирали плодові тіла (12 видів грибів – зразків), визначали їхню видову приналежність, висушували за температури 35 °С до постійної маси для елементного аналізу. Аліквотні частини зразків ґрунту (30–50 г з глибини 0–5 і 5–10 см) використовували для хімічного аналізу та вилучення міцелію. Грибні структури (всього 9 зразків – окремі гіфи, їхні сполучення, ризоморфні утворення, окремі

склероції, окремі інфіковані мікоризні кінчики коренів) отримували із зразків ґрунту під мікроскопом середнього (х60) збільшення з додаванням невеликої кількості дистильованої води. Метод детально описано у Vinichuk & Johanson [13]. Із ґрунтових зразків також вилучали такі фракції ґрунту: едафосфера (9 зразків) – фракція після просіювання ґрунту крізь сито з розміром отворів 2 мм; ризосфера (6 зразків) – частки ґрунту, асоційовані з дрібними та середнього розміру коренями, що залишилися на ситі після просіювання; ризоплана (6 зразків) – дрібні корені рослин ( $\leq 2$  мм) і частки ґрунту безпосередньо на них [6].

Концентрацію елементів у зразках (на суху вагу, с.в.) визначали мас-спектрометричним методом (ICP-MS) у лабораторії ALS Scandinavia AB, Luleå за методикою, наведеною у Rodushkin et al. [11]. Статистичну обробку даних проводили з використанням дисперсійного аналізу (ANOVA) і коефіцієнтів кореляції за Пірсоном. Програмне забезпечення Minitab (© 2010 Minitab Inc).

### Результати і їхнє обговорення

Ми вивчали такі види ектомікоризних грибів: *Boletus edulis* (Bull); *Collybia peronata* (Bolton) P. Kumm. (сапротроф); *Cortinarius odorifer* Britzelm.; *Cortinarius armeniacus* (Schaeff.) Fr.; *Cortinarius* sp.; *Cantharellus tubaeformis* Fr. ; *Hypholoma capnoides* (Fr.) P. Kumm. (сапротроф); *Lactarius deterrimus* Gröger; *Lactarius scrobiculatus* (Scop.) Fr.; *Lactarius trivialis* (Fr.) Fr.; *Sarcodon squamosus* (Schaeff.) Quél.; *Suillus granulatus* (L.) Roussel; *Suillus variegatus* (Sw.) Richon & Roze; та *Tricholoma equestre* (L.) P. Kumm.

Згідно з отриманими нами даними, вміст вільноростучого міцелію у лісовому ґрунті (до глибини 0–10 см) варіює у широкому діапазоні – від 0,07 до 70 мг сухої речовини в одному грамі ґрунту. Враховуючи те, що отримані величини біомаси міцелію у верхніх шарах досліджуваних лісових ґрунтів швидше недооцінені, ніж переоцінені, та враховуючи показник щільності ґрунту  $0,4 \text{ г см}^{-3}$ , приймаємо, що питомий вміст міцелію у цьому шарі ґрунту становитиме від 3 до 6 об'ємних відсотків. Наведені значення досить добре узгоджуються з оцінками, наведеними у наших попередніх роботах [13, 14]. Оцінюючи біомасу тонких ( $\leq 2$  мм у діаметрі) коренів у ґрунті, використовували дані ( $400 \text{ г/м}^2$  до глибини 90 см) для ґрунтів хвойних лісів Бельгії, де у насадженнях переважає сосна звичайна віком 70 років [7]. Розрахунки показують, що середня біомаса коренів ( $\leq 2$  мм) до глибини 0–10 см може бути в межах від 18,4 до 23,4 мг коренів у одному кілограмі ґрунту. Як показано у нашій попередній роботі [16], середня біомаса плодових тіл грибів (переважно види *Cortinarius*, *Suillus* та *Russula*, всього проаналізовано 318 зразків) дорівнює  $0,67$  (діапазон  $0,5 \times 10^{-5}$ – $3,1$ ) г /  $1 \text{ м}^2$ , що в перерахунку на 1 кг ґрунту до глибини 10 см становитиме  $\approx 0,017$  мг/кг.

Вміст радіоцезію у плодових тілах грибів приблизно на порядок перевищує концентрацію радіонукліду у вегетативному тілі гриба – міцелії (табл. 1). Ґрунтуючись на величині питомої активності радіоактивного цезію в міцелії ектомікоризних грибів і оцінках біомаси його у ґрунті, можна стверджувати, що у грибниці може бути локалізовано до 50 % радіонукліду від загального його вмісту в даному шарі ґрунту [12, 13]. У середньому ж, згідно з тими ж даними, міцелій лісових ґрунтів здатен вміщувати у собі  $\approx 15$  % радіонукліду. Плодові тіла грибів містять приблизно на порядок меншу частку радіонукліду – не більше 0,12 % від загальної кількості радіоцезію, зосередженого у надземній фітомасі лісових рослин [16].

Усі три лужні метали – калій (K), рубідій (Rb) і стабільний цезій ( $^{133}\text{Cs}$ ) активно накопичуються як міцелієм грибів, так і їхніми плодовими тілами [7, 15]. Так, встановлено, що вміст калію у фракції ризосфера перевищує, а у фракції ризоплана значно перевищує

концентрацію цього елемента в едафосфері, тоді як концентрація калію у міцелії грибів у 4–5 разів перевищує його вміст у загальній масі ґрунту – едафосфері (табл. 1). Оскільки фракція ризоплана являє собою дрібні корені рослин, можна стверджувати, що вміст калію у міцелії грибів і рослинах приблизно однаковий. Плодові тіла досліджуваних видів грибів містять у середньому 44 956 мг калію на 1 кг маси, що приблизно у 70 разів перевищує вміст цього елемента у ґрунті, та приблизно в 14 разів у рослинах (ризоплана), що зростають у тих же умовах. Високий вміст калію у грибах пояснюється участю останнього у процесах осморегуляції та формуванні плодових тіл.

Рубідію у міцелії грибів містилось у середньому 13,8 мг/кг, а у плодових тілах грибів – 269,2 мг/кг, тоді як у загальній масі ґрунту концентрація рубідію була на рівні 3,98 мг/кг. У фракціях ризосфера та ризоплана вміст рубідію трохи вищий, ніж у ґрунті, – 5,4 та 6,8 мг/кг відповідно (табл. 1). Таким чином, у міцелії грибів вміст рубідію перевищує його вміст у ґрунті у 3,5 разу, а у їхніх плодових тілах – майже у 70 разів. Порівняно з рослинами (ризоплана), що зростають у тих же місцях, вміст рубідію у міцелії грибів є вищим приблизно удвічі, а у їхніх плодових тілах – майже у 40 разів (табл. 1).

Концентрація стабільного цезію в міцелії грибів (0,8 мг/кг) майже втричі перевищує його вміст у загальній масі лісового ґрунту – едафосфері (0,3 мг/кг). Середній вміст цього елемента у плодових тілах досліджуваних видів грибів виявився приблизно у 20 разів вищим від його фонові концентрації. Концентрації цезію у фракції ризосфера та ризоплана мало відрізнялися від концентрації у ґрунті і становили відповідно 0,37 та 0,19 мг/кг (табл. 1). Таким чином, вміст стабільного цезію у міцелії грибів у 4 рази, а у плодових тілах грибів – у 20 разів перевищує вміст цього елемента у рослинах (ризоплана). Отже, стабільний цезій гриби накопичують у менших кількостях, ніж радіоактивний, оскільки стабільний цезій зафіксований у кристалічних решітках мінералів, а отже, біологічна доступність його є нижчою.

Таблиця 1

Середня концентрація елементів у фракціях ґрунту і грибах,  $M \pm SD$ , мг/кг сухої ваги.

n – кількість проаналізованих зразків

Елементи	Едафосфера (n=9)	Ризосфера (n=6)	Ризоплана (n=6)	Міцелій (n=9)	Плодові тіла (n=9)
Калій	643±215	899±301	3 215±843	2 868±728	44 959±20 446
Рубідій	3,98±2,7	5,40±4,40	6,80±1,73	13,8±6,90	269±234
Цезій	0,30±0,23	0,37±0,29	0,19±0,05	0,80±0,80	6,10±6,40
Кальцій	11 785±11 335	16 042±9 513	10 514±7 122	15 780±9 992	323±287
Стронцій	17,1±10,6	22,6±7,77	18,7±7,85	17,9±6,76	0,74±0,73
Торій	1,10±0,89	1,45±1,23	0,28±0,22	0,74±0,70	0,004±0,003
Уран	6,85±12,06	9,36±9,77	5,79±6,89	3,11±3,72	0,02±0,05
Радій	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005

Розрахунки показують, що за вмісту міцелію у межах від 30 до 60 мг сухої речовини в одному грамі ґрунту в ньому може бути зосереджена значна частина загальної кількості калію ґрунту – від 13,4 до 26,8 %. Вміст стабільного цезію ( $^{133}\text{Cs}$ ) у вегетативному тілі ектомікоризних грибів може становити від 7,6 до 15,2 % від загального його вмісту у ґрунті, тоді як частка рубідію, зосередженого у міцелії грибів, становить від 10,4 до 20,9 % (рис. 1).

Вміст кальцію (Ca) та стронцію (Sr) у міцелії грибів виявився трохи вищим, ніж їхні концентрації у фракції едафосфера. Так, концентрація кальцію та стронцію становила 15 780 та 17,9 мг/кг у міцелії грибів і 11 785 та 17,1 мг/кг у фракції едафосфера відповідно. Плодові тіла містять мало кальцію – в середньому 323 мг/кг речовини (табл. 1). З огляду на вміст міцелію у ґрунті, частка кальцію, яка може бути зосереджена у вегетативному тілі

гриба, від загального вмісту елемента у ґрунті є незначною і становитиме від 4,0 до 8,0 %. Близькі значення отримано і для стронцію: грибний міцелій може містити від 3,2 до 6,3 % від загального вмісту елемента у ґрунті (рис. 1). Вміст стронцію у плодкових тілах грибів у середньому становить 0,74 мг/кг, тоді як у ґрунті – 14,3 мг/кг. Хоча структурні функції кальцію у грибах невідомі і його доступ до апопласту обмежений, він все ж наявний у клітинах грибів у відносно невисоких концентраціях. Відомо також, що даний елемент концентрується переважно на поверхні міцелію у вигляді великих кристалів, які можна спостерігати, наприклад, на щільно переплетених гіфах маслака зернистого (*Suillus granulatus* (L.)) [17].

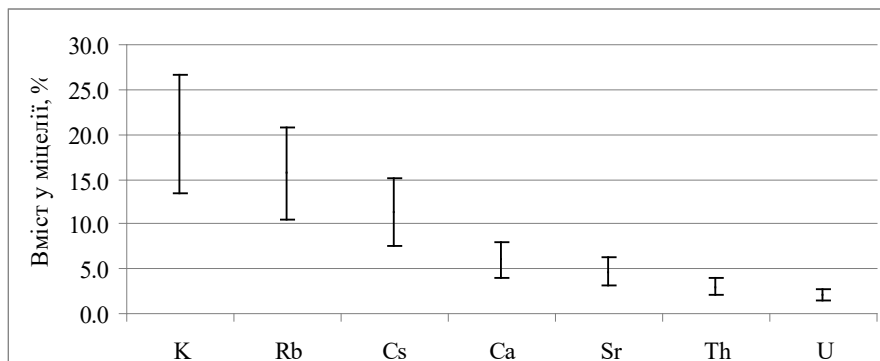


Рис. 1. Відносний вміст лужних і лужноземельних металів, а також актиноїдів у міцелії ектомікоризних грибів від загальної їхньої кількості у верхньому (0-10 см) шарі лісового ґрунту, %

Середній вміст торію (Th) у міцелії грибів виявився приблизно на третину нижчим від його концентрації у фракціях едафосфера та ризосфера. У фракції ризоплана середня концентрація цього елемента становила 0,28 мг/кг. У плодкових тілах грибів вміст торію виявився на порядки нижчий (0,004 мг/кг) від його вмісту у міцелії (табл. 1).

Концентрація урану (U) в міцелії грибів приблизно удвічі нижча від його вмісту у загальній масі лісового ґрунту – едафосфері, та втричі нижча від концентрації у ризосфері. Вміст урану у фракції ризоплана був на рівні 5,8 мг/кг, а концентрація у плодкових тілах грибів – 0,02 мг/кг (табл. 1).

Очевидно, що обидва актиноїди не накопичуються ані грибами, ні рослинами. Низький вміст обох елементів у плодкових тілах грибів може свідчити про наявність ефективного механізму запобігання надходженню в них як урану, так і торію. Розрахунки показують, що за таких концентрацій у міцелії грибів може бути зосереджено від 1,4 до 2,7 % урану та від 2,0 до 4,1 % торію загального їхнього вмісту у верхньому, 0–10 см шарі лісового ґрунту [2].

Вміст радію ( $^{226, 228}\text{Ra}$ ) у всіх досліджуваних фракціях, включаючи і гриби, становив менше 0,005 мг/кг.

Розрахунки показують, що у фракції ризоплана (дрібні корені рослин) зосереджена порівняно незначна частина загального вмісту досліджуваних елементів у ґрунті. Так, виходячи з умови, що вміст даного компоненту у ґрунті становить 18,4–23,4 мг в одному кілограмі ґрунту, у ньому відповідно може міститись у % від загального вмісту у ґрунті 9,2–11,7 % калію; 3,2–4,0 % рубідію; 2,0–2,6 % стронцію; 1,6–2,9 % кальцію; 1,6–2,0 % урану. Вміст інших елементів у фракції ризоплана виявився < 2,0 % від загального їхнього вмісту у ґрунті.

Розрахунки також показують, що навіть за значно вищої концентрації окремих із досліджуваних елементів у плодкових тілах грибів, порівняно з їхнім вмістом у загальній

масі ґрунту, останні, внаслідок незначної їхньої біомаси, містять у собі дуже малу частину елементів від їхньої загальної кількості у ґрунті. Так, найбільше у плодових тілах грибів зосереджено калію (0,12 %) та рубідію (0,11 %), тоді як вміст інших елементів вимірюється сотими й тисячними частками відсотка.

Вміст елементів у плодових тілах досліджуваних видів грибів також помітно варіює. Так, підвищені концентрації Ca та Sr виявлено у плодових тілах рядовки зеленої (*Tricholoma equestre*), торію у плодових тілах хряща-молочника (*Lactarius deterrimus*), калію, рубідію, цезію та урану у плодових тілах павутиників (*Cortinarius* spp.).

Мікроскопічний метод, за допомогою якого отримані кількісні оцінки (біомасу) вільноростучого міцелію, зосередженого у верхніх шарах лісового ґрунту, має певні обмеження, оскільки не забезпечує повного вилучення досліджуваного матеріалу із ґрунту. Тому величина біомаси міцелію у ґрунті швидше недооцінена, ніж переоцінена. Наведені у даній роботі відсотки вмісту того чи іншого елемента у вегетативному тілі грибів хоча і добре узгоджуються з результатами інших досліджень, але насправді можуть бути навіть вищими.

Поряд із цим, дані дослідження свідчать про таке:

1. У міцелії грибів концентрація Ca, Rb,  $^{133}\text{Cs}$  та Th вища, ніж у рослинах (фракція ризоплана), що зростають у тих же місцях.
2. Концентрація K, Sr та U в міцелії грибів є такою ж або навіть нижчою, ніж у рослинах.
3. Серед досліджуваних елементів K, Rb та  $^{133}\text{Cs}$  інтенсивно акумулюються міцелієм грибів – концентрація їх у міцелії грибів є значно вищою, ніж у загальній масі ґрунту (едафосфері).
4. Найбільш інтенсивно міцелій грибів накопичує K, Rb та  $^{133}\text{Cs}$ .
5. Такі елементи як Ca та Sr не накопичуються грибами: у міцелії грибів і едафосфері концентрація їх приблизно однакова.
6. Концентрація актиноїдів (Th та U) у міцелії грибів є помітно нижчою, ніж у едафосфері, що може свідчити про наявність ефективного механізму перешкоджання надходження їх у гриби.
7. У міцелії грибів може бути зосереджено від  $\approx 2\%$  (Th) до  $\approx 27\%$  (K) від загального вмісту елемента у верхньому (0–10 см) шарі лісового ґрунту.
8. Серед досліджуваних видів найбільш інтенсивно накопичують плодові тіла *Tricholoma equestre* (Ca, Sr), *Lactarius deterrimus* (Th), *Cortinarius* spp. (K, Rb, Cs, U). Відносний вклад названих видів у загальну кількість того чи іншого елемента у ґрунті  $< 1\%$ .
9. Фракція ризоплана (дрібні корені рослин) містить у собі приблизно удвічі меншу частку від загального вмісту досліджуваних елементів у ґрунті, порівняно з їхнім вмістом у міцелії грибів.

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

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Вінчук М.* Радіоекологічні функції мікоризоутворюючих макроміцетів. Житомир, 2011. 238 с.
2. *Вінчук М.* Торій та уран у фракціях ґрунту та окремих видах макроміцетів бореальних лісових екосистем // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Біологія. Екологія. 2012. № 20 (2). С. 10–17.
3. *Плотников М. А.* Биологическая аккумуляция радионуклидов высшими грибами в условиях лесных экосистем Пензенской области: дис. .... канд. биол. наук: 03.02.08. М., 2011. 136 с.
4. *Berthelsen B. O., Olsen R. A., Steinnes E.* Ectomycorrhizal heavy metal accumulation as a contributing factor to heavy metal levels in organic surface soils // *Sci. Total Environ.* 1995. Vol. 170. N 1–2. P. 141–149.
5. *Gasó M., Segovia N., Morton O.* et al.  $^{137}\text{Cs}$  and relationships with major and trace elements in edible mushrooms from Mexico // *Sci. Total Environ.* 2000. Vol. 262. N 1–2. P. 73–89.
6. *Gorban G. R., Clegg S.* A conceptual model for nutrient availability in the mineral soil-root system // *Can. J. Soil Sci.* 1996. Vol. 76. P. 125–131.
7. *Janssens I. A., Sampson D. A., Curiel-Yuste J.* et al. The carbon cost of fine root turnover in a Scots pine forest // *Forest Ecol. Management.* 2002. Vol. 168. P. 231–240.
8. *Johanson K. J., Vinichuk M. M., Taylor A., Nikolova I.* Uptake of elements by fungi in the Forsmark area. SKB Rapport, SKB TR-04-26. SLU, 2004. 77 p.
9. *Olsen R. A.* The transfer of radiocaesium from soil to plants and fungi in seminatural ecosystems. In: *Nordic Radioecology: The transfer of radionuclides through Nordic ecosystems to man.* Edited by H. Dahlgard, 1994. 62. Elsevier, Amsterdam, P. 265–287.
10. *Read D., Perez-Moreno J.* Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems – a journey towards relevance? // *New Phytologist.* 2003. Vol. 157. P. 475–492.
11. *Rodushkin I., Engström E., Sörlin D., Baxter D.* Levels of inorganic constituents in raw nuts and seeds on the Swedish market // *Sci. Total Environ.* 2008. Vol. 392. P. 290–304.
12. *Vetter J.* Zinc content of sporocarps of basidiomycetous fungi / J. Vetter, I. Siller, Zx. Horváth // *Mycologia.* 1997. Vol. 89. P. 481–483.
13. *Vinichuk M., Johanson K.* Accumulation of  $^{137}\text{Cs}$  by fungal mycelium in forest ecosystems of Ukraine // *J. Environ. Radioact.* 2003. Vol. 64. P. 27–43.
14. *Vinichuk M., Johanson K., Taylor A.*  $^{137}\text{Cs}$  in the fungal compartment of Swedish forest soils // *Sci. Total Environ.* 2004. Vol. 323. P. 243–251.
15. *Vinichuk M., Rosén K.* Cesium ( $^{137}\text{Cs}$  and  $^{133}\text{Cs}$ ) and Selected Metals in the Environment, Publisher: Science Publishing Group, (In English). 2015. 102 pp.
16. *Vinichuk M., Rosén K., Dahlberg A.*  $^{137}\text{Cs}$  in fungal sporocarps in relation to vegetation in a bog, pine swamp and forest along a transect // *Chemosphere.* 2013. Vol. 90. N 2. P. 713–720.
17. *Wallander H., Mahmood S., Hagerberg D.* et al. Elemental composition of ectomycorrhizal mycelia identified by PCR-RFLP analysis and grown in contact with apatite or wood ash in forest soil // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2003. 44 (1). P. 57–65.

Стаття: надійшла до редакції 17.11.17

доопрацьована 16.04.18

прийнята до друку 02.05.18



**BIOACCUMULATION OF SELECTED ALKALI METALS,  
ALKALINE EARTH METALS AND ACTINIDES IN MYCELIUM AND FRUIT  
BODIES OF ECTOMYCORRHIZAL FUNGI**

**M. Vinichuk**

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

We attempted to quantify the content of alkaline and alkaline earth metals as well as selected actinides in the free-growing mycelium of ectomycorrhizal fungi in the upper (0–10 cm) soil layers of the boreal forest ecosystems of Sweden. The content of these elements in the bulk soil, rhizosphere, soil-root interface, and fungal fruit bodies was also measured and compared. Specifically we analyzed the content of potassium (K), rubidium (Rb), stable cesium ( $^{133}\text{Cs}$ ), radioactive cesium ( $^{137}\text{Cs}$ ), calcium (Ca), strontium (Sr), thorium (Th) and uranium (U). It has been shown that within fungal mycelium may be localized up to 50 % (on average,  $\approx 15\%$ ) of the total radioactivity of the radioactive radiocaesium in the soil. Fruit bodies of fungi contain approximately an order of magnitude less of the radionuclide – up to 0,12 % of the total activity concentration of radiocaesium concentrated in the above-ground forest vegetation. In addition to radioactive caesium, all three alkali metals – K, Rb and  $^{133}\text{Cs}$  actively accumulated by fungal mycelium as well as their fruit bodies. The concentration of potassium in the mycelium of fungi was 4–5, and in the fruit bodies about 70 times greater than the content of this element in the bulk soil. The concentration of rubidium in the mycelium of fungi was found to be 3.5 times higher, and in their fruit bodies – almost 70 times higher of that in bulk soil. The concentration of stable cesium in the mycelium of fungi and their fruit bodies exceeded its content in the bulk soil by factor 3 and 20 respectively. Fungi do not accumulate alkaline earth metals Ca and Sr – its concentrations in the fungal mycelium and bulk soil was nearly the same. The concentration of actinides (Th and U) in the fungal mycelial is found to be significantly lower than in bulk soil. Within the body of wild growing fungal mycelia may be comprised between  $\approx 2\%$  (Th) and  $\approx 27\%$  (K) of the total content of the element in the upper (10 cm) organic reach layers of forest soil.

*Keywords:* bulk soil, metals, mycelium, fruiting bodies, rhizosphere, soil-root interface