

ДК 574:635.21

М. М. ВІНІЧУК¹, д-р біол. наук, проф., Г. В. СКИБА¹, канд. техн. наук, доц.,
Т. О. ЄЛЬНІКОВА¹, канд. техн. наук, доц., Ю. Н. МАНДРО¹,

¹Житомирський державний технологічний університет

вул Чуднівська 103, 10005, м. Житомир, Україна

e-mail: mykhailo59@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8042-9282>

e-mail: skybagalya26@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8765-8849>

e-mail: kpn_shto@ztu.edu.ua

e-mail: yurii.mandro@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-4621-0719>

БІОАКУМУЛЯЦІЯ ОКРЕМИХ МЕТАЛІВ ТА НЕМЕТАЛІВ У МІЦЕЛІЇ ТА ПЛОДОВИХ ТІЛАХ ЕКТОМІКОРИЗНИХ ГРИБІВ

Мета. У статті узагальнені результати оцінки вмісту окремих металів та неметалів у вільноростучому міцелії, плодкових тілах ектомікоризних грибів, а також у фракціях верхніх (0–10 см) шарів ґрунту бореальних лісових екосистем, таких як едафосфера (загальна маса ґрунту), ризосфера та ризоплана. **Методи.** Концентрацію елементів у зразках (на суху вагу, с.в.) визначали мас-спектрометричним методом. **Результати.** У міцелії ектомікоризних грибів можуть акумулюватись помітні кількості досліджуваних елементів, зокрема кадмію. Йод, хром та нікель не накопичуються, ані міцелієм грибів, ні їх плодовими тілами. Мідь, цинк та кадмій накопичуються як плодовими тілами досліджуваних видів грибів, так і міцелієм досить інтенсивно. **Висновки.** У міцелії ектомікоризних грибів вміст досліджуваних елементів, крім кадмію, не перевищує 10 %, тоді як кадмію міститься від 16,2 до 32,3%.

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

Vinichuk M. M., Skyba G. V., Yelnikova T. O., Mandro Y. N.

Zhytomyr State Technological University

BIOACCUMULATION OF SELECTED METALS AND NON-METALS IN MYCELIUM AND FRUIT BODIES OF ECTOMYCORRHIZAL FUNGI

Purpose. We attempted to quantify the contribution of wild-growing mycelium of ectomycorrhizal fungi to the soil level of selected metals and non-metals in upper (0–10 cm) layer of forest soil of boreal forest ecosystems. The content of selected elements were also analyzed and compared in such fractions of soil as bulk soil, rhizosphere and soil-root interface. Specifically we analyzed the content of phosphorus (P), manganese (Mn), iodine (I), chromium (Cr), nickel (Ni), copper (Cu), zinc (Zn), cadmium (Cd), cobalt (Co), mercury (Hg) lead (Pb) and arsenic (As). **Methods.** The concentration of the elements in the samples (dry weight, d.w.) was determined by the mass spectrometric method (ICP-MS) in the laboratory ALS Scandinavia AB, Luleå. Statistical data processing was performed using dispersion analysis (ANOVA) and Pearson correlation coefficients. Software Minitab (© 2010 Minitab Inc.). **Results.** It has been shown that concentration of phosphorus in the mycelium of fungi is about 1.5 times, and in the fruit bodies is about 7 times higher of that the plant tissue (soil+root interface). The concentration of manganese in the mycelium is about the same as in the bulk soil and much lower in the fraction of rhizosphere. Iodine, chromium and nickel are not accumulated, neither the mycelium of fungi nor in their fruitful bodies. Copper, zinc and cadmium are accumulated in both fruit bodies and mycelium of the studied species intensively. The concentration of cadmium in the mycelium is found to be about three times higher than in the bulk soil fraction, and about twice as high as in the fraction of rhizosphere. At such concentrations of cadmium in mycelium, the later may account from 16.2 to 32.3% of the total amount of cadmium in the upper, 0-10 cm layer of forest soils. The content of cobalt and mercury in the mycelium appeared to be somewhat higher in the bulk soil, about the same as in the rhizosphere fraction, and significantly higher than in the soil-root interface fraction. Fungi did not accumulate lead neither in the mycelium nor in their fruit bodies, whereas arsenic does not accumulated in soil-root interface and only weakly accumulated by fungal fruit bodies. **Conclusions.** As a result of the study, it was found that the content of most of the analyzed metals and non-metals in the mycelium of ectomycorrhizal fungi of the upper (0-10 cm) soil enriched with organic matter in the forest ecosystem, except for cadmium and phosphorus, does not exceed 10% of their total amount. At the same time, the content of cadmium in the mycelium of fungi was the highest – 16.2 to 32.3%, which indicates the ability of fungi to accumulate this metal. It is suggested that the percentages of the content of the elements studied in the mycelium of upper layers of forest soil is rather underestimated than overestimated.

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

Виничук М. М., Скиба Г. В., Ельникова Т. О., Мандро Ю. Н.

Житомирський державний технологічний університет

БИОАККУМУЛЯЦИЯ ОТДЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ И НЕМЕТАЛЛОВ В МИЦЕЛИИ И ПЛОДОВЫХ ТЕЛАХ ЭКТОМИКОРИЗНЫХ ГРИБОВ

Цель. В статье обобщены результаты оценки содержания отдельных металлов и неметаллов в свободнорастущем мицелии и плодовых телах эктомикоризных грибов, а также во фракциях верхних (0–10 см) слоев почвы бореальных лесных экосистем, таких как эдафосфера (общая масса почвы), ризосфера и ризоплана. **Методы.** Концентрацию элементов в образцах (на сухой вес, с.в.) определяли масс-спектрометрическим методом (ICP-MS). **Результаты.** В мицелии эктомикоризных грибов могут накапливаться заметные количества исследуемых элементов, в частности кадмия. Йод, хром и никель не накапливаются, ни мицелием грибов, ни их плодовыми телами. Медь, цинк и кадмий накапливаются, как плодовыми телами исследуемых видов грибов, так и мицелием достаточно интенсивно. **Выводы.** В мицелии эктомикоризных грибов содержание исследуемых элементов, кроме кадмия, не превышает 10%, тогда как кадмия содержится от 16,2 до 32,3%.

Ключевые слова: эдафосфера, мицелий, металлы, плодовые тела, ризоплана, ризосфера

Вступ

Постановка проблеми. У ґрунтах бореальних лісових екосистем у складі мікробної біомаси переважають гриби, а мицелій, як сапротрофних, так і мікоризних видів відіграє важливу роль, як в руйнуванні органічної речовини, так і в процесах мінерального живлення рослин через густу мережу симбіотичних мікоризних асоціацій [12]. Екзоферменти, що виділяються грибним мицелієм сприяють вивільненню елементів живлення з органічних субстратів, в результаті чого, як мицелій, так і плодове тіла грибів здатні накопичувати значну кількість есенціальних макроелементів [14].

Аналіз останніх публікацій. Добре відомо, що деревні породи інфіковані ектомікоризними грибами ефективніше використовують фосфор (P) ґрунту, ніж ті, що не формують мікориз [5]. Гриби також досить ефективно поглинають з ґрунту і інші елементи [14], серед яких, як есенціальні мікроелементи, такі як мідь (Cu) та цинк (Zn), а також важкі метали, зокрема, кадмій (Cd) [15]. Останній викликає особливе занепокоєння з точки зору вмісту його у продуктах харчування, оскільки його поведінка у системі “ґрунт-гриби” аналогічна поведінці таких важливих мікроелементів як цинк та мідь. Всі ці елементи – кадмій, цинк та мідь накопичуються плодовими тілами грибів [3]. Плодові тіла багатьох ектомікоризних грибів можуть містити надзвичайно високі рівні важких металів, але саме кадмій накопичується ними найбільш інтенсивно [6]. У такий спосіб, гриби, зокрема їх плодове тіла, беруть участь у колообігу важких металів у лісових екосистемах через біоаккумуляцію [9]. Мицелію ектомікоризних грибів належить важлива роль у вилученні мікроелементів з ґрунту та транспортуванні їх у плодове тіло гриба [4], що визначає міграцію цих елементів у лісо-

вих екосистемах. Здатність грибів накопичувати та утримувати у своєму тілі мікроелементами, у тому числі і важкі метали, сильно варіює залежно від виду [11]. Так, окремі з них, такі як кобальт (Co) та нікель (Ni), а також важкі метали, наприклад (Pb), навпаки, не накопичуються грибами [2], а ефективно з них вилучаються.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Більшість з приведених результатів стосуються плодових тіл грибів, які порівняно легко аналізуються та досліджуються. Між тим, плодове тіло гриба становить лише декілька ($\approx 5\%$) відсотків від загальної біомаси окремо взятого організму [10]. Це означає, що переважна частина біомаси грибів ґрунту представлена мицелієм, який розташований у верхніх, збагачених на органічну речовину ґрунтових горизонтах [12]. Хоча оцінити величину біомаси мицелію ґрунту надзвичайно складно, деякі підходи та відповідно оцінки все ж існують [10]. Це дозволяє визначити, яка кількість того чи іншого елемента може бути зосереджена у грибах, зокрема у мицелії. З огляду на складність дослідження мицелію грибів “*in situ*”, відомі лише поодинокі намагання встановити здатність саме вегетативного тіла грибів накопичувати мікроелементи, включаючи і важкі метали [2].

Постановка завдання. Для розуміння механізмів ефективної акумуляції елементів ектомікоризними грибами важливо дослідити участь окремих ґрунтових фракцій у цих процесах. Очевидно, що для розуміння згаданих процесів важливе значення мають такі ґрунтові фракції як ризосфера та ризоплана, які можуть розглядатись як окремі ланки у трофічних взаємозв'язках, зокрема для ектомікоризних грибів.

Метою даної роботи є кількісна оцінка накопичення та розподілу окремих металів та неметалів у міцелії та плодкових тілах ектомікоризних грибів, а також у окремих ґрунтових фракціях, таких як едафосфера,

Об'єкти та методи дослідження

Дослідження проводились у лісових екосистемах центральної Швеції, на глинисто-піщаних ґрунтах. Переважними видами у 80-100 річних деревостанах є ялина європейська (*Picea abies* (L.) H. Karst.) та сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.) а у трав'янистому покриві здебільшого зустрічаються чорниця (*Vaccinium myrtillus* L.), орляк звичайний (*Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn), підбіл звичайний (*Tussilago farfara* L.), хвощ лісовий (*Equisetum silvaticum* L.). Зразки ґрунту та плодові тіла грибів відбирались протягом вересня-листопаду з десяти ділянок (близько 10 м² 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 в діаметрі) відбирали 4 зразки ґрунту до глибини 10 см навколо та безпосередньо у місцях зростання плодкових тіл грибів ($\approx 0,5$ м²). Там же відбирали плодові тіла (12 видів грибів – зразків), визначали їх видову приналежність, висушували при температурі 35 °С до постійної маси для елементного аналізу. Аліквотні частини зразків ґрунту (30-50 г з глибини 0-5 та 5-10 см) використовували для хімічного аналізу та вилучення міцелію. Грибні структури (всього 9 зразків - окремі гіфи, їх сполучення, ризоморфні утворення, окремі склероції, окремі інфіковані мікоризні кінчики коренів) отримували із зразків ґрунту під мікроскопом середнього (x60) збільшення з додаванням невеликої кількості дистильо-

ризосфера та ризоплана у лісових екосистемах. У розрахунках були використані отримані нами оцінки біомаси міцелію у верхніх (0-10 см) шарах лісових ґрунтах Швеції [16].

ваної води. Метод детально описано у Vinichk & Johanson [17]. З ґрунтових зразків також вилучали такі фракції ґрунту: едафосфера (9 зразків) – фракція після просіювання ґрунту через сито з розміром отворів 2 мм; ризосфера (6 зразків) – частки ґрунту, асоційовані з дрібними та середнього розміру коренями, що залишились на ситі після просіювання; ризоплана (6 зразків) – дрібні корені рослин (≤ 2 мм) та частки ґрунту безпосередньо на них [7].

Концентрацію елементів у зразках (на суху вагу, с.в.) визначали маспектрометричним методом (ICP-MS) в лабораторії ALS Scandinavia AB, Luleå за методикою приведеною у Rodushkin et al., [13]. Статистичну обробку даних проводили з використання дисперсійного аналізу (ANOVA) і коефіцієнтів кореляції за Пірсоном. Програмне забезпечення Minitab (© 2010 Minitab Inc).

Нами вивчали наступні 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.

Результати та обговорення

Вміст вільно ростучого міцелію у лісовому ґрунті (до глибини 0-10 см) варіює у широкому діапазоні – від 0,07 до 70 мг сухої речовини у 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 г см⁻³, приймаємо, що питомий вміст міцелію у цьому шарі ґрунту становитиме від 3 до 6 об'ємних відсотків. Приведені значення досить добре узгоджуються з оцінками, наведеними у наших попередніх роботах [17]. При оцінці біомаси тонких (≤ 2 мм у діаметрі)

коренів у ґрунті використовували дані (400 г/м² до глибини 90 см) для ґрунтів хвойних лісів Бельгії, де у насадженнях переважає сосна звичайна віком ≈ 70 років [8]. Розрахунки показують, що середня біомаса коренів (≤ 2 мм) до глибини 0-10 см може бути у межах від 18,4 до 23,4 мг коренів у одному кілограмі ґрунту. Як показано у нашій попередній роботі [18], середня біомаса плодкових тіл грибів (переважно види *Cortinarius*, *Suillus* та *Russula*, n = 318) дорівнює 0,67 (діапазон 0,5x10⁻⁵–3.1) грам / 1м², що у перерахунку на 1 кг ґрунту становитиме $\approx 0,017$ мг/кг.

Результати показують (табл.), що досліджувані види грибів містять порівняно багато фосфору (P). Так, фосфору у міцелії грибів виявилось приблизно у 2 рази (1 222 мг/кг), а у плодових тілах грибів у середньому на порядок (5 463 мг/кг) більше у порівнянні з концентрацією цього елемента у ґрунті (559,4 мг/кг). Вміст фосфору у фракціях ризосфера та ризоплана знаходиться на рівні його концентрації у ґрунті (табл.).

Отже, міцелій грибів містить приблизно у 1,5 рази, а плодові тіла грибів приблизно у 7 разів більше фосфору, ніж рослини. Ймовірно це пояснюється участю ектомікоризних грибів у забезпеченні рослин фосфором та відповідно його акумуляцією. Розрахунки також показують, що у міцелії грибів фосфору може міститись від 6,5 до 13,1% від загальної його кількості у ґрунті (рис.).

Таблиця

Середня концентрація елементів у фракціях ґрунту та грибах, $M \pm SD$, мг/кг с.в.

Елементи	Едафосфера (n=9)	Ризосфера (n=6)	Ризоплана (n=6)	Міцелій (n=9)	Плодові тіла (n=9)
Фосфор	559±195	558±86,0	766±91,0	1 222±296	5 463±1 854
Марганець	179±218	114±32,2	92,7±23,0	157±156	15,3±10,1
Йод	3,03±1,61	3,83±0,93	1,99±0,96	2,06±1,49	0,12±0,19
Хром	2,79±1,94	4,31±3,47	1,05±0,81	2,65±2,81	0,16±0,29
Нікель	3,45±2,06	4,62±2,11	2,01±1,03	3,13±1,85	0,50±0,34
Мідь	10,4±7,75	13,1±5,54	11,9±4,46	15,8±5,70	28,8±17,3
Цинк	38,5±24,5	31,9±9,6	44,2±5,36	69,7±22,1	120±106
Кадмій	0,29±0,13	0,35±0,11	0,81±0,39	1,55±1,62	3,13±3,14
Кобальт	0,79±0,44	1,06±0,60	0,59±0,29	0,98±0,65	0,09±0,12
Ртуть	0,18±0,09	0,16±0,04	0,10±0,03	0,24±0,11	0,72±0,94
Свинець	18,4±8,6	16,5±6,16	7,70±2,40	12,6±4,65	0,24±0,17
Миш'як	0,97±0,44	1,04±0,34	0,66±0,29	0,98±0,37	1,57±2,00

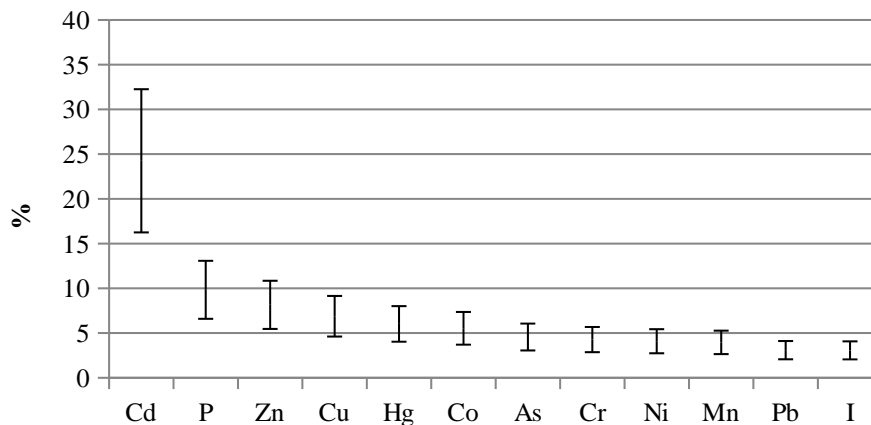


Рис. – Відносний вміст окремих металів та неметалів у міцелії ектомікоризних грибів від загальної їх кількості у верхньому (0-10 см) шарі лісового ґрунту, %

Хоча марганець (Mn) вважається есенціальним елементом необхідним для росту грибів, середній вміст його у міцелії виявився приблизно таким же, як і його концентрація у фракції едафосфера, дещо вищим у порівнянні з фракцією ризосфера, та помітно нижчим у порівнянні з фракцією ризоплана. Середня концентрація цього елемента у плодових тілах грибів (15,3 мг/кг)

на порядок нижче як його вмісту у міцелії так і у едафосфері (табл.). Отже, марганець не накопичується, ані міцелієм грибів, ні їх плодовими тілами. На порядок нижчий вміст марганцю у плодових тілах грибів, ніж у ґрунті, може свідчити про наявність ефективного механізму перешкоджання надходження його у гриби. Згідно розрахунків у вегетативному тілі грибів може бути

зосереджена лише незначна частка цього елемента – від 2,8 до 5,6% від загального вмісту у ґрунті (рис.).

Йод (I) згідно наших даних також не акумулюється грибами. Концентрація йоду у міцелії грибів та фракції ризоплана становила $\approx 2,0$ мг/кг, що дещо нижче його вмісту у загальній масі ґрунту – едафосфері та ризосфері. Середній вміст йоду у плодових тілах грибів на рівні 0,12 мг/кг, що значно нижче фонового значення (табл.). Отже, згідно отриманих нами даних міцелій грибів може містити у собі порівняно невелику частку йоду – від 2,0 до 4,0% від загальної кількості у ґрунті (рис.).

Як хром (Cr), так і нікель (Ni) також не накопичуються, ані міцелієм грибів, ні їх плодовими тілами (табл.). Так, концентрація хрому у фракції ризоплана та плодових тілах грибів у 4-7 разів, а концентрація нікелю у 2-4 рази нижча ніж у загальній масі ґрунту. Концентрація досліджуваних елементів у міцелії грибів (2,65 та 3,13 мг/кг відповідно для хрому та нікелю) майже не відрізняється від концентрації цих елементів у загальній масі ґрунту (2,79 та 3,45 мг/кг) відповідно (табл.). Концентрація хрому у загальній масі ґрунту виявилась значно вищою гранично-допустимих значень (0,05 мг/кг), тоді як концентрація нікелю не перевищувала ГДК (4,0 мг/кг) ґрунту. Між тим, у плодових тілах окремих видів грибів (*Cortinarius armeniacus*, *Sarcodon squamosus*) вміст нікелю майже у 2,5 рази перевищував середнє значення – 1,230 та 1,120 мг/кг нікелю відповідно. Встановлено, що у міцелії грибів верхнього (0-10 см) шару лісового ґрунту може бути зосереджена порівняно незначна частка цих елементів: 2,9-5,8% хрому та 2,7-5,4% нікелю від їх загального вмісту у ґрунті відповідно [1].

Мідь (Cu), цинк (Zn) та кадмій (Cd) накопичуються як плодовими тілами досліджуваних видів грибів, так і міцелієм досить інтенсивно. Концентрація міді у загальній масі ґрунту (10,4 мг/кг) виявилась приблизно втричі вищою встановлених гранично-допустимих значень (3,0 мг/кг). Концентрація міді у міцелії грибів у 1,5 рази, а концентрація у плодових тілах грибів майже втричі перевищує її вміст як у загальній масі лісового ґрунту – едафосфері, так і у фракції ризосфера. У порівнянні з рослинами (фракція ризоплана), вміст міді у міцелії грибів виявився у 1,5 рази, а у плодових тілах

грибів – у 2,5 рази вищий (табл. 1). Плодові тіла *Collybia peronata* та *Sarcodon squamosus* характеризувались підвищеним вмістом міді – 53,3 та 64,1 мг/кг при середньому значенні 28,8 мг/кг, що майже втричі перевищує гранично-допустиме значення (10,0 мг/кг) для грибів. Зауважимо, що значення ГДК для плодових тіл грибів тут і нижче по тексту приведені у розрахунку на свіжу вагу, тоді як концентрація елементів у них (табл.) розрахована на суху вагу. Розрахунки також показують, що у міцелії грибів може бути зосереджено (від загального вмісту у верхньому, 0-10 см шарі лісового ґрунту) від 4,6 до 9,1% міді [16]. На думку Berthelsen et al. [2], частка міді, зосередженої у ектомікоризи верхніх, багатих на органічну речовину шарах ґрунту хвойних лісів може досягати 100%.

Концентрація цинку у загальній масі ґрунту (38,5 мг/кг) дещо перевищувала гранично-допустимий рівень (23,0 мг/кг) вмісту цього елемента для ґрунту. Вміст цинку у міцелії грибів (69,7 мг/кг) майже вдвічі перевищує вміст цього елемента у едафосфері (38,5 мг/кг), а його концентрація у плодових тілах грибів (120,2 мг/кг) – майже вдвічі вища, ніж у міцелії (табл.). Отже, у плодових тілах досліджуваних видів грибів концентрація цинку перевищувала показник ГДК (20,0 мг/кг) приблизно у шість разів. У плодових тілах видів *Cortinarius* вміст цинку вдвічі (258 мг/кг) перевищував середнє значення для всіх досліджуваних видів, та більше ніж на порядок гранично-допустимий рівень. Концентрація цинку у фракції ризосфера та ризоплана мало відрізняються від вмісту його у ґрунті – 31,9 та 44,2 мг/кг відповідно. Як видно з приведених даних, вміст цинку у міцелії грибів у 1,5 рази, а у плодових тілах грибів – майже втричі перевищує вміст цього елемента у рослинах, що зростають у тих же умовах. Розрахунки також показують, що у міцелії грибів може міститись від 5,4 до 10,9% загального вмісту цинку у ґрунті [16].

Концентрація кадмію у загальній масі ґрунту (0,29 мг/кг) виявилась помітно нижчою встановлених гранично-допустимих значень (0,7 мг/кг) для ґрунту. Між тим, вміст кадмію у міцелії грибів в середньому втричі перевищував значення концентрації цього елемента у фракції едафосфера та ризосфера, та, виявився приблизно, вдвічі вищим ніж у фракції ризоплана, що свідчить про активне

накопичення цього елемента, як грибами, так і рослинами (табл.). При цьому у міцелії грибів кадмію було вдвічі більше, ніж у рослинах. У плодових тілах грибів середня концентрація кадмію на порядок (3,13 мг/кг) перевищує вміст цього елемента у загальній масі ґрунту, та є приблизно у тридцять разів вищою гранично-допустимих значень (0,1 мг/кг). Досліджувані види мають різну здатність акумулювати кадмій: найбільше кадмію виявлено у плодових тілах *Cortinarius armeniacus* (11,0 мг/кг), а найменше – у *Suillus granulatus* (0,16 мг/кг).

Розрахунки показують, що при таких концентраціях цього елемента у міцелії грибів, у ньому може бути зосереджено від 16,2 до 32,3% від загальної кількості елемента у верхньому, 0-10 см шарі лісового ґрунту (рис.). Дані оцінки досить добре узгоджуються з даними Berthelsen et al., [2], згідно яких, при вмісті кадмію у різних морфологічних типах мікоризи $4,6 \pm 1,9$ мкг/г, у міцелії верхнього шару лісового ґрунту може бути зосереджено 33% кадмію від загального вмісту цього елемента у ґрунті.

Висока концентрація кадмію у міцелії ектомікоризних грибів, їх плодових тілах, а також у фракції ризоплана обумовлена тим, що кадмій у ґрунті (у формі Cd^{2+}) є досить рухливим елементом, мобільність якого є вищою ніж, наприклад, цинку (Zn^{2+}), особливо у добре аерованих ґрунтах з кислою реакцією ґрунтового розчину. Причиною цього є зокрема те, що Cd^{2+} досить слабо адсорбується, як органічною речовиною ґрунту, так і на часточках глинистих мінералів, за виключенням випадків коли рН ґрунту становить 6 і вище. Саме такі умови переважно і спостерігаються у досліджуваному нами ґрунті, що і обумовлює високий вміст цього елемента у грибах.

Концентрація кобальту (Co) у загальній масі ґрунту (0,79 мг/кг) також виявилась помітно нижчою встановлених гранично-допустимих значень (5,0 мг/кг) для ґрунту. Вміст кобальту у міцелії грибів виявився дещо вищим його концентрації у фракції едафосфера, та приблизно таким же як у фракції ризосфера, і помітно вищим ніж у фракції ризоплана (табл.). Середня концентрація кобальту у плодових тілах грибів виявилась на порядок (0,09 мг/кг) нижчою у порівнянні з концентрацією у міцелії (табл.). Таким чином, можна стверджувати, що кобальт не акумулюється, ані вегетативним

тілом гриба, ні його плодовими тілами. Тому, у вегетативному тілі грибів може бути зосереджено лише незначна частка даного елемента – від 3,7 до 7,4% від загального його вмісту у ґрунті (рис.).

Подібна ситуація спостерігається і у випадку ртуті (Hg): вміст ртуті у загальній масі ґрунту (0,18 мг/кг) на порядок нижча гранично-допустимих значень (2,1 мг/кг). Вміст ртуті у міцелії грибів також мало відрізняється від концентрації цього елемента у загальній масі ґрунту – едафосфері та ризосфері, але виявився приблизно на порядок нижчим у фракції ризоплана (табл.). Ймовірно, що грибами, зокрема міцелієм, даний елемент теж не акумулюється, хоча середня концентрація його у плодових тіла є помітно вищою (0,72 мг/кг) у порівнянні з вмістом у ґрунті, та значно вищою значення ГДК (0,05 мг/кг). Таким чином, концентрація ртуті у плодових тілах грибів приблизно у 7 разів перевищує концентрацію у рослинах. Виходячи з кількісних оцінок вмісту міцелію у ґрунті, у останньому може бути зосереджено від 4,0 до 8,0% ртуті від загальної її кількості у верхньому шарі ґрунту (рис.).

Свинець (Pb), вміст якого у едафосфері (18,4 мг/кг) виявився у межах гранично-допустимих значень (20,0 мг/кг) згідно наших оцінок теж не акумулюється, ані міцелієм грибів, ні їх плодовими тілами. Так, при середньому вмісті свинцю у едафосфері та ризосфері 18,4 та 16,5 мг/кг концентрація його у міцелії становила 12,6 мг/кг, а середній вміст у плодових тілах грибів досліджуваних видів, лише 0,24 мг/кг (табл.), що приблизно вдвічі (0,5 мг/кг) нижче ГДК для грибів. У фракції ризоплана вміст свинцю виявився приблизно у 2 рази нижчим ніж у ґрунті. Розрахунки також показують, що у міцелії грибів може бути зосереджена порівняно невелика кількість цього елемента – від 2,1 до 4,1% від загального вмісту його у ґрунті (рис.). Такі оцінки досить добре узгоджуються з результатами досліджень інших авторів. Так, згідно даних [2] при вмісті свинцю у мікоризних утвореннях 35 ± 6 мкг/г, у біомасі грибів може бути зосереджено приблизно 2% свинцю від загального його вмісту у ґрунті.

Вміст миш'яку (As) у плодових тілах грибів у середньому становить 1,57 мг/кг (ГДК 0,5 мг/кг), у той час як у міцелії грибів концентрація його знаходиться на рівні вмісту цього елемента у загальній масі ґрунту –

едафосфері та ризосфері $\approx 1,0$ мг/кг, а у фракції ризоплана, концентрація його виявилась майже вдвічі нижчою – 0,66 мг/кг (табл.). Отже, даний елемент не накопичується рослинами і лише слабо накопичується плодовими тілами грибів. При згаданій вище концентрації миш'яку у міцелії грибів, кількість даного елемента у грибах може бути у межах від 3,0 до 6,0% від загального вмісту миш'яку у верхньому, 0-10 см шарі лісового ґрунту (рис.).

Розрахунки показують, що у фракції ризоплана може бути зосереджено порівняно незначна кількість від загального вмісту досліджуваних елементів у ґрунті. Так, виходячи з умови, що вміст даного компоненту у ґрунті становить 18,4-23,4 мг у одному кілограмі ґрунту, у ньому відповідно може міститись у % від загального вмісту у ґрунті 9,2-11,7% калію; 5,2-6,6% кадмію; 2,5-3,2% фосфору; 2,1-2,7% міді; 2,1-2,7% цинку. Вміст інших елементів у фракції ризоплана < 2,0% від загального їх вмісту у ґрунті.

Розрахунки також показують, що навіть при значно вищій концентрації окремих з

досліджуваних елементів у плодових тілах грибів у порівнянні з вмістом їх у загальній масі ґрунту, останні, внаслідок незначної їх біомаси, містять у собі дуже малу кількість елементів від їх загального вмісту у ґрунті. Так, найбільше з досліджуваних елементів у плодових тілах грибів зосереджено кадмію (0,02%), тоді як вміст інших елементів вимірюється сотими та тисячними частками відсотка.

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 з ґрунту. Тому, ймовірно, що величина біомаси міцелію у ґрунті швидше недооцінена ніж переоцінена. Приведені у даній роботі відсотки вмісту того чи іншого елемента у вегетативному тілі грибів хоча і добре узгоджуються з результатами інших досліджень, і в дійсності можуть бути навіть вищими.

Висновки

Дані отримані в результаті проведення дослідження показують, що:

- у міцелії грибів концентрація P, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, As, Cd, Hg та Pb у 1,5-2 рази вища ніж у рослинах (фракція ризоплана), що зростають у тих же місцях;
- концентрація Cu та I у міцелії грибів є такою ж або навіть нижчою ніж у рослинах;
- серед досліджуваних елементів P, Cu, Zn, та Cd інтенсивно акумулюються міцелієм грибів – концентрація їх у міцелії грибів є у 2-3 рази вищою ніж у загальній масі ґрунту (едафосфері);
- найбільш інтенсивно міцелієм грибів накопичується Cd: вміст кадмію у міцелії у 5 разів вищий його вмісту у загальній масі ґрунті;
- такі елементи як Cr, Mn, Co, Ni, As, та Hg не накопичуються грибами: у міцелії грибів та едафосфері концентрація їх приблизно однакова;
- концентрація таких елементів як I та Pb у міцелії грибів є помітно нижчою ніж у едафосфері, що може свідчити про наявність ефективного механізму перешкоджання надходження їх у гриби;

- у міцелії грибів може бути зосереджено від $\approx 2\%$ (I, Pb) до $\approx 32\%$ (Cd) від загального вмісту елемента у верхньому (0-10 см) шарі лісового ґрунту;
- серед досліджуваних видів найбільш інтенсивно накопичують плодові тіла *Collybia peronata* (Cu), *Cortinarius* spp. (As, Cd, Cr, Co, Ni, Zn); *Sarcodon squamosus* (Cu, Hg, Ni), хоча відносний їх вклад у загальну кількість того чи іншого елемента у ґрунті < 1%;
- фракція ризоплана (дрібні корені рослин) містить у собі приблизно у 2 рази меншу частку від загального вмісту досліджуваних елементів у ґрунті у порівнянні з їх вмістом у міцелії грибів.

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

Література

1. Вінічук М.М. Хром та нікель у фракціях ґрунту та окремих видах макроміцетів бореальних лісових екосистем. *Вісник Запорізького національного університету. Біологічні науки*. 2012. № 3. С.103-110.
2. Berthelsen B., Olsen R., Steinnes E. Ectomycorrhizal heavy metal accumulation as a contributing factor to heavy metal levels in organic surface soils. *Science of the Total Environment*. 1995. Vol. 170. P. 141-149.
3. Blaudez D., Botton B., Chalot M. Cadmium uptake and subcellular compartmentation in the ectomycorrhizal fungus *Paxillus involutus*. *Microbiology*. 2000. Vol. 146. №. 5. P. 1109–1117.
4. Brzostowski A., Jarzyńska G., Kojta A., Wydmańska D., Falandysz J. Variations in metal levels accumulated in Poison Pax (*Paxillus involutus*) mushroom collected at one site over four years. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2011. Vol. 46. №. 6. P. 581–588.
5. Burgess T., Malajczuk N., Grove N. The ability of 16 ectomycorrhizal fungi to increase growth and phosphorus uptake of *Eucalyptus globulus* Labill. and *E. diversicolor* F. Muell. *Plant and Soil*. 1993. Vol. 153. №. 2. P. 155–164.
6. Byrne A., Ravnik V., Kosta L. Trace element concentrations in higher fungi. *Science of the Total Environment*. 1976. Vol. 6. №. 1. P. 65–78.
7. Gorban G., Clegg S. A conceptual model for nutrient availability in the mineral soil-root system. *Canadian Journal of Soil Science*. 1996. V. 76. P. 125–131.
8. Janssens I., Sampson D., Curiel-Yuste J., Carrara A., Ceulemans R. The carbon cost of fine root turnover in a Scots pine forest. *Forest Ecology and Management*. 2002. Vol. 168. P. 231–240.
9. Lepp N., Harrison S., Morrell B. A role for *Amanita muscaria* L. in the circulation of cadmium and vanadium in a non-polluted woodland. *Environmental Geochemistry and Health*. 1987. Vol. 9. №. 3-4. P. 61–64.
10. Olsen R. The transfer of radiocaesium from soil to plants and fungi in semi-natural ecosystems. In: *Nordic Radioecology: The transfer of radionuclides through Nordic ecosystems to man*. Edited by H. Dahlgard, 1994. 62. Elsevier, Amsterdam, P. 265–287.
11. Pérez A., Fariás S., Strobl A., Pérez L., López C., Piñeiro A., Roses O., Fajardo M. Levels of essential and toxic elements in *Porphyra columbina* and *Ulva* sp. from San Jorge Gulf, Patagonia Argentina. *Science of the Total Environment*. 2007. Vol. 376. №. 1-3. P. 51–59.
12. Read D., Perez-Moreno J. Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems – a journey towards relevance? *New Phytologist*. 2003. Vol. 157. P. 475–492.
13. Rodushkin I., Engström E., Sörlin D., Baxter D. Levels of inorganic constituents in raw nuts and seeds on the Swedish market. *Science of the Total Environment*. 2008. Vol. 392. P. 290–304.
14. Smith S. Mycorrhizal Symbiosis. London, UK, 2nd edition. Academic Press. 1997. 605 pp.
15. Stijve T., Besson R. Mercury, cadmium, lead and selenium content of mushroom species belonging to the genus *Agaricus*. *Chemosphere*. 1976. Vol. 5. №. 2. P. 151–158.
16. Vinichuk M. Copper, zinc, and cadmium in various fractions of soil and fungi in a Swedish forest. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2013. № 4(48). P. 980–987.
17. Vinichuk M., Johanson K. Accumulation of ¹³⁷Cs by fungal mycelium in forest ecosystems of Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2003. Vol. 64. P. 27–43.
18. Vinichuk M., Rosén K., Dahlberg A. ¹³⁷Cs in fungal sporocarps in relation to vegetation in a bog, pine swamp and forest along a transect. *Chemosphere*. 2013. Vol. 90. № 2. P. 713–720.

References

1. Vinichuk, M.M. (2012). Khrom ta nikel u fraktsiiakh ґрунту та окремих видках макроміцетів бореальних лісових екосистем. [Chromium and nickel in soil fractions and certain types of macromycetes of boreal forest ecosystems]. *Visnyk Zaporizkoho natsionalnoho universytetu. Biologichni nauky*, 3, 103-110. [In Ukrainian].
2. Berthelsen B., Olsen R., Steinnes E. (1995). Ectomycorrhizal heavy metal accumulation as a contributing factor to heavy metal levels in organic surface soils. *Science of the Total Environment*. 170. 141-149. [In English].
3. Blaudez D., Botton B., Chalot M. (2000). Cadmium uptake and subcellular compartmentation in the ectomycorrhizal fungus *Paxillus involutus*. *Microbiology*. 146(5). 1109–1117. [In English].
4. Brzostowski A., Jarzyńska G., Kojta A., Wydmańska D., Falandysz J. (2011). Variations in metal levels accumulated in Poison Pax (*Paxillus involutus*) mushroom collected at one site over four years. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 46 (6). 581–588. [In English].
5. Burgess T., Malajczuk N., Grove N. (1993). The ability of 16 ectomycorrhizal fungi to increase growth and phosphorus uptake of *Eucalyptus globulus* Labill. and *E. diversicolor* F. Muell., *Plant and Soil*. 153(2). 155–164. [In English].

6. Byrne A., Ravnik V., Kosta L. (1976). Trace element concentrations in higher fungi. *Science of the Total Environment*. 6 (1). 65–78. [In English].
7. Gorban G., Clegg S. (1996). A conceptual model for nutrient availability in the mineral soil-root system. *Canadian Journal of Soil Science*. 76. 125–131. [In English].
8. Janssens I., Sampson D., Curiel-Yuste J., Carrara A., Ceulemans R. (2002). The carbon cost of fine root turnover in a Scots pine forest. *Forest Ecology and Management*. 168. 231–240. [In English].
9. Lepp N., Harrison S., Morrell B. (1987). A role for *Amanita muscaria* L. in the circulation of cadmium and vanadium in a non-polluted woodland. *Environmental Geochemistry and Health*. 9 (3-4). 61–64. [In English].
10. Olsen R. (1994). The transfer of radiocaesium from soil to plants and fungi in semi-natural ecosystems. In: *Nordic Radioecology: The transfer of radionuclides through Nordic ecosystems to man*. Edited by H. Dahlgaard, 62. Elsevier, Amsterdam, 265–287. [In English].
11. Pérez A., Farías S., Strobl A., Pérez L., López C., Piñeiro A., Roses O., Fajardo M. (2007). Levels of essential and toxic elements in *Porphyra columbina* and *Ulva* sp. from San Jorge Gulf, Patagonia Argentina. *Science of the Total Environment*. 376 (1-3). 51–59. [In English].
12. Read D., Perez-Moreno J. (2003). Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems – a journey towards relevance? *New Phytologist*. 157. 475–492. [In English].
13. Rodushkin I., Engström E., Sörlin D., Baxter D. (2008). Levels of inorganic constituents in raw nuts and seeds on the Swedish market. *Science of the Total Environment*. 392. 290–304. [In English].
14. Smith S. (1997). *Mycorrhizal Symbiosis*. London, UK, 2nd edition. Academic Press. 605. [In English].
15. Stijve T., Besson R. (1976). Mercury, cadmium, lead and selenium content of mushroom species belonging to the genus *Agaricus*. *Chemosphere*. Vol. 5. №. 2. P. 151–158. [In English].
16. Vinichuk M. (2013). Copper, zinc, and cadmium in various fractions of soil and fungi in a Swedish forest. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 4(48). 980–987. [In English].
17. Vinichuk M., Johanson K. (2003). Accumulation of ¹³⁷Cs by fungal mycelium in forest ecosystems of Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity*. 64. 27–43. [In English].
18. Vinichuk M., Rosén K., Dahlberg A. (2013). ¹³⁷Cs in fungal sporocarps in relation to vegetation in a bog, pine swamp and forest along a transect. *Chemosphere*. 90(2). 713–720. [In English].

Надійшла до редколегії 28.03.2019