

МІКОРИЗАЦІЯ СОНЯШНИКУ АРБУСКУЛЯРНИМ МІКОРИЗНИМ ГРИБОМ *FUNNELIFORMIS MOSSEAE* ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПЕРЕХІД РАДІОЦЕЗІЮ ІЗ ҐРУНТУ В РОСЛИНУ

М. Вінічук

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

Досліджено вплив передпосівного внесення арбускулярних мікоризних (АМ) грибів *Funneliformis mosseae* (Т.Н. Nicolson & Gerd.) С. Walker & A. Schüßler у ґрунт при вирощуванні рослин соняшнику на величину переходу ^{137}Cs із ґрунту в рослини в умовах вегетаційного та польового дослідів. В умовах вегетаційного досліді використовували супіщаний, середньосуглинковий та глинистий ґрунт, а в польовому досліді – середньосуглинковий. Встановлено, що інфіковані рослини соняшнику порівняно з рослинами контрольного варіанта мали удвічі вищу продуктивність (плоди, листки та стебла), а також удвічі вищі коефіцієнти накопичення (КН) ^{137}Cs при вирощуванні їх в умовах вегетаційного досліді на супіщаному ґрунті. Між значеннями коефіцієнтів накопичення ^{137}Cs рослинами соняшнику й інтенсивністю мікоризної інфекції бічних коренів рослин, вирощуваних на супіщаному ґрунті в умовах вегетаційного досліді, є тісна статистично достовірною кореляційною залежністю. Приріст урожаю та підвищення рівня переходу радіонукліду із ґрунту в рослини внаслідок інокуляції були менш очевидними при вирощуванні їх на середньосуглинковому ґрунті в умовах вегетаційного досліді. При вирощуванні рослин на глинистому ґрунті в умовах вегетаційного досліді та на середньосуглинковому ґрунті у польовому досліді значення продуктивності й коефіцієнти накопичення ^{137}Cs інокульованих рослин були на рівні рослин контрольного варіанта.

Ключові слова: арбускулярні мікоризні гриби, ґрунт, інокуляція, соняшник, радіоцезій.

Відомо, що окремі ґрунтові мікроорганізми, серед них і ектомікоризні гриби, активно поглинають радіонукліди, зокрема ^{137}Cs [18, 19], і можуть накопичувати його у своїх тілах на порядки більше, ніж рослини, що ростуть у тих же біотопах [19]. Поряд із тим, унаслідок низького вмісту мікобіоти в лісових ґрунтах, останні акумулюють у собі порівняно невелику частину загальної кількості радіоцезію ґрунту [5]. На відміну від ектомікоризних грибів, радіоекологічні функції ендомікоризи або арбускулярно-везикулярної мікоризи (АМ), яка вважається найдавнішою та найпоширенішою формою симбіозу рослин з мікроорганізмами, досліджені недостатньо [1]. Хоча результати досліджень можливостей арбускулярно-везикулярних грибів сприяти акумуляції радіоцезію інфікованими ними рослинами з метою фітореємедіації забруднених радіонуклідами земель і були опубліковані у низці робіт [1, 3, 6, 7], питання на сьогодні залишається значною мірою не з'ясоване. Результати досліджень радіоекологічних функцій арбускулярних мікоризних грибів і можливості використання їх з метою фітореємедіації ґрунтів, забруднених радіонуклідами, є неоднозначні, а часто навіть суперечливі [19, 20]. Так, у деяких роботах [6] показано, що міцелій арбускулярних мікоризних грибів може брати безпосередню участь у транслокації радіоцезію до коренів рослин. Іншими даними доведено, що інокуляція арбускулярними мікоризними грибами рослин сприяла підвищенню рівнів накопичення радіоцезію

рослинами буркуну лікарського [12], райграсу пасовищного [8] та соняшнику [7]. У той же час результати цілої низки інших досліджень свідчать, що АМ гриби, навпаки, можуть знижувати рівні накопичення радіоцезію інокульованими рослинами [14, 19, 20]. Очевидно, що ефективність використання АМ грибів у цілях фітореMediaції зумовлюється низкою чинників, які здатні модифікувати кінцевий результат, а саме видом рослини-хазяїна, типом ґрунту й умовами експерименту [4]. *Стосовно останнього варто зазначити*, що переважна більшість відомих на сьогодні результатів щодо можливостей використання АМ грибів з метою стимулювання накопичення радіоцезію мікоризними рослинами були отримані в умовах вегетаційних та/або лабораторних досліджень. Поряд із тим, відомо, що симбіотичні взаємовідносини, що формуються між рослиною-хазяїном і штамом арбускулярних мікоризних грибів в умовах теплиці чи лабораторії, не завжди залишаються такими ж у польових умовах [9]. Результатів досліджень, які би підтверджували або спростовували наявність ефекту інокуляції мікоризних рослин АМ грибами на величину переходу радіоцезію із ґрунту в рослини у польових умовах, практично немає [1, 19]. Тому можливість використання АМ грибів з метою фітореMediaції забруднених радіонуклідами ґрунтів остаточно не встановлена і потребує подальших досліджень. Ми експериментально перевірили гіпотезу про те, що арбускулярні мікоризні гриби можуть використовуватись у цілях фітореMediaції забруднених радіоцезієм ґрунтів однаково ефективно (чи неефективно) як в умовах теплиці, так і в польових умовах.

Метою роботи було дослідити, яким чином внесення у ґрунт мікоризних грибів *Funneliformis mosseae* впливає на рівень накопичення радіоцезію у плодах, листках і стеблах при вирощуванні такої цінної зернової й технічної культури як соняшник на ґрунтах різного гранулометричного складу в умовах вегетаційних і польових дослідів.

Соняшник – однорічна рослина зі стрижневою, дуже розгалуженою кореневою системою, яка має добре розвинений головний корінь, що проникає у ґрунт на 100–200 і більше см, а також бічні корені. Крім того, що соняшник забезпечує велику біомасу, він також найбільш ефективно акумулює радіоцезій з-поміж інших видів, чим заслуговує на увагу як культура, потенційно придатна для використання в цілях фітореMediaції. Так, показано, що корені соняшнику накопичують у вісім разів більше ^{137}Cs , ніж корені тимофіївки (*Phleum pratense* L.) або лисохвосту (*Alopecurus pratensis* L.) [15], а при вирощуванні соняшнику в умовах гідропоніки у тканинах цієї культури переходило до 12% загальної кількості радіоцезію [16]. Таким чином, ми дослідили можливість використання алохтонного штаму АМ гриба *Funneliformis mosseae* при вирощуванні соняшнику з метою підбору комбінації рослин, різновидів ґрунтів і АМ грибів, найбільш придатних для фітореMediaції радіоактивно забруднених ґрунтів.

Матеріали та методи

Веgetаційний дослід: проводили у 2008 р. на таких ґрунтах: супіщаному (вміст фракції 0,06–2 мм $76,1 \pm 0,6\%$, $\text{pH}_{0,01 \text{ M CaCl}}$ $4,2 \pm 0,03$), середньосуглинковому (вміст фракції 0,06–2 мм $42,3 \pm 3,6\%$, $\text{pH}_{0,01 \text{ M CaCl}}$ $4,9 \pm 0,08$) та глинистому (вміст фракції 0,06–2 мм $13,1 \pm 0,8\%$, $\text{pH}_{0,01 \text{ M CaCl}}$ $4,8 \pm 0,01$) з різною щільністю забруднення (табл. 1). Схема досліду передбачала три варіанти: попередньо стерилізований та інокульований АМ грибами ґрунт (АМ+), стерилізований ґрунт (АМ–) і контроль (необроблюваний ґрунт). Повторність досліду 5-кратна. Ґрунт перемішували та просівали через сито 2 мм. У варіанті АМ+ перед посівом у ґрунт вносили матеріал, який містить спори та гіфи АМ грибів у пропорції 1:100. У варіанті АМ– ґрунт стерилізували протягом 3 год при температурі 121°C і тиску 2 бари. Рослини соняшнику (*Helianthus annuus* L.) вирощували в теплиці у пластикових посудинах об'ємом $4,2 \text{ дм}^3$, добрива не використовували. Наприкінці цвітіння – на початку

фізіологічної стиглості рослини зрізували, плоди відділяли, листки та стебла висушували до постійної ваги, подрібнювали їх і проводили радіометрію. Питому активність ^{137}Cs у ґрунті й рослинах визначали на HPGe детекторах із перерахунком на дату відбору зразків. Коефіцієнти накопичення ^{137}Cs (КН) розраховували як відношення активності радіонукліда в рослині, Бк/кг сухої ваги (с.в.) до активності ^{137}Cs в ґрунті, Бк/кг с.в.

Польовий дослід: проводили у 2009–2010 рр. на землях Народицького р-ну Житомирської обл. поблизу населеного пункту Христинівка ($51^{\circ}14'55''$ пн. ш., $29^{\circ}13'09''$ сх. д.) на дерново-підзолистому середньосуглинковому ґрунті (вміст фракції $0,06\text{--}2$ мм $\approx 60\%$, $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ $6,6\pm 0,06$). Схема досліду аналогічна наведеній вище: інокульований АМ грибами ґрунт (АМ+), ґрунт, оброблений фунгіцидом “Benlate” (АМ–), і контроль (необроблюваний ґрунт). Щільність радіоактивного забруднення за $^{137}\text{Cs} = 832\pm 53$ кБк/м² [20]. Розмір посівної площі експериментальної ділянки $7,2$ м² ($3,0$ м x $2,4$ м), облікової площі $2,8$ м² ($1,4$ м x $2,0$ м). Повторність досліду 4-кратна. Перед посівом у ґрунт вносили матеріал, що містить спори та гіфи АМ грибів з розрахунку 5 мл на 1 см³ ґрунту з подальшим перемішуванням його з верхнім $2\text{--}3$ -сантиметровим шаром ґрунту. Концентрація водного розчину фунгіциду забезпечувала кінцеву концентрацію 125 мг/кг ґрунту. Методика підготовки зразків і радіометричні вимірювання аналогічні до наведених вище.

Інтенсивність мікоризної інфекції коренів інокульованих рослин визначали шляхом занурювання останніх у 20% розчин гідроксиду калію з подальшим промиванням водопровідною водою і підкисленням 1% соляною кислотою. Після цього корені зафарбовували $0,05\%$ розчином трипанового синього в розчині: молочна кислота-гліцерин-вода ($14:1:1$). Інтенсивність інфекції оцінювали візуально під бінокулярним мікроскопом як 0 = немає інфекції, 1 = поодинокі інфекції, 2 = помірно інфіковані корені, 3 = сильно інфіковані корені. У досліді використовували арбускулярний мікоризний продукт «Муко-Умрі», виробник фірма МТТ Agrifood Research (Фінляндія), який містить спори та гіфи арбускулярного мікоризного гриба *Funneliformis mosseae* разом із матеріалом-носієм (субстратом) – стерилізована парою суміш торфу, піску та перліту.

Результати і їхнє обговорення

Передпосівне внесення у ґрунт арбускулярних мікоризних грибів *Funneliformis mosseae* при вирощуванні соняшнику в умовах вегетаційного досліді свідчить про неоднозначність стимулювального впливу цього заходу на величину біомаси досліджуваних рослин порівняно з рослинами, що росли на стерилізованому ґрунті й контрольних варіантах на всіх досліджуваних ґрунтах (табл. 1). Так, біомаса плодів, стебел і листків інокульованих рослин соняшнику (АМ+), що вирощувалися на супіщаному ґрунті, виявилася майже удвічі вищою порівняно з рослинами, що росли на контрольному варіанті та на варіанті зі стерилізованим ґрунтом (АМ–). При вирощуванні рослин на середньосуглинковому ґрунті ефект інокуляції виявився менш помітним: біомаса плодів соняшнику на дослідному варіанті (АМ+) перевищувала біомасу рослин варіанта зі стерилізованим ґрунтом і контрольного у $1,5$ та $2,2$ рази відповідно. Впливу інокуляції на приріст листків і стебел досліджуваної культури на даному ґрунті не виявлено. При вирощуванні соняшнику на глинистому ґрунті ефекту інокуляції арбускулярним грибом на величину біомаси не встановлено. Отримані дані дають підстави стверджувати, що вплив арбускулярних мікоризних грибів на продуктивність соняшнику залежить від ґрунту, на якому вирощують соняшник. Ефект інокуляції на продуктивність рослин соняшнику виявився найвищим при вирощуванні їх на супіщаному ґрунті, тоді як в умовах середньосуглинкового ґрунту він є неоднозначним, а в умовах глинистого ґрунту його взагалі немає. Характерно, що продуктивність соняш-

нику, який вирощували на двох останніх ґрунтових відмінах, виявилася практично однаковою у варіантах з інокульованими (АМ+) рослинами та з тими, що росли на стерилізованому ґрунті (АМ-). Відсутність ефекту інокуляції рослин на величину біомаси рослин сояшнику порівняно з тими, що росли на стерилізованому ґрунті, ймовірно, пояснюється тим, що стерилізація ґрунту могла зумовлювати додаткове вивільнення елементів живлення з біоти ґрунту, насамперед мікобіоти при дії високих температур і тиску.

Результати дослідження інтенсивності мікоризної інфекції бічних коренів дослідних рослин сояшнику спорами АМ грибів показали, що в АМ+ варіанті на глинистому ґрунті траплялися тільки поодинокі інфекції – $0,6 \pm 0,55$, тоді як на середньосуглинковому ґрунті інтенсивність мікоризної інфекції коренів була приблизно удвічі вищою – $1,2 \pm 1,0$. Інтенсивність мікоризної інфекції коренів сояшнику, виділених зі супіщаного ґрунту, була оцінена як помірною – $1,6 \pm 0,55$ [19]. Встановлено, що у рослин на глинистому ґрунті залежностей між інтенсивністю мікоризної інфекції коренів рослин і величиною біомаси листків і стебел ($r = -0,07$) та інтенсивністю мікоризної інфекції коренів рослин і величиною біомаси плодів ($r = -0,04$) немає. В умовах середньосуглинкового ґрунту інтенсивність мікоризної інфекції коренів рослин лише слабо корелює з величиною біомаси плодів ($r = 0,37$), тоді як для листків і стебел такої залежності взагалі немає ($r = 0,02$). Поряд із тим, між помірною інтенсивністю мікоризної інфекції коренів рослин сояшнику на супіщаному ґрунті ($1,6 \pm 0,55$) та величиною біомаси цих рослин є сильна позитивна статистично достовірна кореляція для плодів ($r = 0,80^{**}$) і для стебел та листя ($r = 0,81^{**}$). Таким чином, результати кореляційного аналізу підтверджують, що вища продуктивність рослин сояшнику дослідного варіанта (АМ+), які вирощувалися на супіщаному ґрунті, спричинена саме ефектом інокуляції ґрунту спорами арбускулярних грибів. Поряд із тим показано, що підвищення продуктивності інокульованих рослин залежить не стільки від інтенсивності мікоризної інфекції, скільки від симбіозу як такого і пов'язаної з нею продуктивності фотосинтезу [2].

В умовах польового дослідження продуктивність плодів сояшнику коливалась у межах від 11,6 до 16,0, а листків і стебел – від 719 до 894 г/м² с.в. Як видно з даних табл. 2, продуктивність рослин сояшнику, як плодів, так і стебел і листків, що вирощувалися на варіантах із внесенням інокулянта (АМ+), виявилася на 10–20% вищою порівняно з варіантом, ґрунт якого було оброблено фунгіцидом (АМ-) та на 20–30% вищою порівняно з контрольним варіантом. Таким чином, отримані дані дають підстави стверджувати, що внесення у ґрунт АМ грибів як в умовах вегетаційного дослідження, так і в польових умовах підвищує продуктивність рослин сояшнику. Аналіз інтенсивності мікоризної інфекції коренів рослин показує, що бічні корені сояшнику в АМ+ варіанті були помірно інфіковані спорами АМ грибів ($1,25$ з $3,0$) [19]. На відміну від результатів вегетаційного дослідження, в умовах польових досліджень залежностей між інтенсивністю мікоризної інфекції коренів і величиною продуктивності рослин не виявлено. Коефіцієнти кореляції між інтенсивністю інфекції коренів і продуктивністю інокульованих рослин становили $0,25$ та $0,35$ для біомаси листків, стебел і плодів відповідно.

Питома активність радіоцезію у рослинах сояшнику, вирощуваного в умовах як вегетаційного, так і польового дослідів, коливалась у широкому діапазоні залежно від щільності радіоактивного забруднення ґрунтів, що досліджувались. Вміст радіонукліда у вегетативних органах рослин (стебла і листки) на всіх досліджених варіантах виявився в середньому у 3–4 рази вищим, ніж у плодах. При вирощуванні рослин на середньосуглинковому ґрунті (вегетаційний дослід) питома активність радіоцезію у стеблах і листках сояшнику виявилася приблизно у 8 разів вищою, ніж у плодах. Чіткий

стимульовальний вплив інокуляції ґрунту спорами АМ грибів на величину питомої активності радіонукліда порівняно зі стерилізованим ґрунтом і контролем, спостерігався у рослинах сояшнику, що вирощувались на супіщаному ґрунті в умовах вегетаційного дослідження (табл. 1). Так, у плодах сояшнику, вирощених на інокульованому спорами грибів (АМ+) ґрунті, питома активність ^{137}Cs виявилась удвічі вищою порівняно з плодами стерилізованого ґрунту й контрольного варіанта. Вміст радіонукліда у вегетативних органах рослин, вирощуваних на АМ+ варіанті, виявився у 2,5 рази вищим порівняно з контролем, тоді як рослини АМ- варіанта накопичували приблизно таку ж кількість радіонукліда, як і рослини дослідного варіанта АМ+. Очевидно, що стерилізація ґрунту при високих температурах спричиняє додаткове вивільнення не лише елементів живлення з біоти ґрунту, насамперед мікобіоти, а й також і радіонукліда, підвищуючи біологічну доступність останнього у ґрунті та відповідно сприяючи переходові його із ґрунту в рослину. Це призводить до нівелювання ефекту мікоризації на величину накопичення радіоцезію дослідними рослинами. Вплив інокуляції на перехід радіоцезію із ґрунту в рослину, вирощувану на середньосуглинковому та глинистому ґрунтах виявився непевним: вегетативні органи рослин сояшнику на варіанті АМ+ накопичували трохи більше радіонукліда порівняно з АМ- та контрольним варіантом, тоді як плоди АМ+ варіанта мали таку ж або навіть нижчу активність радіоцезію, ніж плоди АМ- та контрольного варіанта.

Таблиця 1

Ефективність передпосівного внесення у ґрунт арбускулярних мікоризних грибів (АМ) при вирощуванні сояшнику, (М±SD), n=5. Вегетаційний дослід

Варіант дослідження	Супіщаний ґрунт ¹⁾		Середньосуглинковий ґрунт ¹⁾		Глинистий ґрунт ¹⁾	
	Плоди	Листки і стебла	Плоди	Листки і стебла	Плоди	Листки і стебла
Біомаса, г / посудину с.в.						
АМ+	3,23±1,05	12,9±1,45 ⁴⁾	8,63±1,41	28,8±1,80	7,21±3,08	30,2±2,85
АМ-	1,31±1,10*	5,72±2,88**	5,86±2,38	27,2±10,3	5,84±3,38	32,2±7,85
Контроль ²⁾	1,97±0,58	5,76±0,41	4,00±0,74	25,8±3,68	6,47	25,2±1,39
^{137}Cs , Бк/кг с.в.						
АМ+	71,2±18,5 ⁴⁾	246,8±144,2	192,1±65,5	1927±1041	2,4±2,2	17,2±5,90
АМ-	29,2±43,7	219,7±64,5	101,2±53,4*	651±299	5,4±7,5	16,1±5,70
Контроль ²⁾	27,7±39,1	91,7±40,1	200,5±93,0	1375±769	3,00	3,34±4,72
^{137}Cs КН ⁵⁾ ($\times 10^{-3}$)						
АМ+	96,2±24,5 ⁴⁾	335,9±201,0	4,49±1,53	44,9±23,7	4,14±3,86	29,7±11,4
АМ-	37,6±53,7	290,3±80,1	2,37±1,26*	15,2±7,16	9,13±12,7	26,7±9,49
Контроль ²⁾	42,9±60,7	143,7±60,0	4,74±2,18	32,5±18,1	8,00	8,17±11,6

Примітка:¹⁾ щільність забруднення: супіщаний ґрунт – 8,0±0,1 кБк/м²; середньосуглинковий ґрунт – 456,5±1,7 кБк/м²; глинистий ґрунт – 5,1±0,1 кБк/м²; ²⁾n=2; ³⁾n=3; ⁴⁾n=4; ⁵⁾ КН розраховували як відношення активності ^{137}Cs у рослині, Бк/кг с.в. до активності ^{137}Cs у ґрунті, Бк/кг с.в., *p<0,05; **p<0,01.

Очевидно, що підвищений вміст радіоцезію у плодах сояшнику, який вирощували на супіщаному ґрунті, зумовлений саме ефектом мікоризації, оскільки це добре узгоджується з інтенсивністю мікоризної інфекції коренів цих дослідних рослин, яка виявилася найвищою порівняно зі середньосуглинковим і глинистим ґрунтом.

Відсутність впливу інокуляції АМ грибами на величину переходу радіонукліда із ґрунту в рослини сояшнику спостерігалась і в умовах польового дослідження. Так, вміст радіоцезію в рослинах (вегетативних органах і плодах) на АМ+ варіанті виявився нижчим або приблизно таким самим порівняно з рослинами АМ- і контрольного варіанта (табл. 2). Встановлено, що між інтенсивністю мікоризної інфекції коренів рослин сояшнику (1,3 з 3,0) в умовах польового дослідження та величиною переходу радіоцезію із ґрунту в рослини залежність відсутня: r=0,33 для вегетативних органів і r=0,19 для плодів [20].

Коефіцієнти накопичення радіоцезію (^{137}Cs , КН) рослинами соняшнику у вегетаційному досліді коливалися залежно від ґрунту і щільності його забруднення у межах від 0,008 до 0,096 для плодів та від 0,008 до 0,336 для листків і стебел (табл. 1). Величини коефіцієнтів накопичення у міру їхнього зростання можна розмістити в такому порядку залежно від досліджуваних ґрунтових відмін: глинистий ґрунт > середньосуглинковий ґрунт > супіщаний ґрунт.

Як видно з даних табл. 1, перехід радіонукліда з ґрунту в інфіковані АМ грибами рослини соняшнику виявився вищим щодо контрольного варіанта майже у 2 рази на супіщаному ґрунті та майже у 4 рази на глинистому ґрунті. Інокульовані рослини, що вирощувалися на середньосуглинковому ґрунті, накопичували ті ж кількості радіонукліда (плоди) або навіть більші (листки і стебла) порівняно з рослинами контрольного варіанта. У рослин, що вирощувалися на стерилізованому ґрунті (АМ–), чітких відмінностей порівняно з інокульованими рослинами не спостерігали, і результати є суперечливими: коефіцієнти накопичення радіонукліда цими рослинами були нижчими, такими ж або навіть вищими порівняно з інфікованими грибами рослинами.

У польовому досліді значення коефіцієнтів накопичення радіоцезію коливались у межах 0,029–0,040 для плодів і 0,095–0,109 для листків і стебел (табл. 2). Як видно з даних таблиці, стимулювального впливу інокуляції ґрунту АМ грибами на величину переходу радіоцезію із ґрунту в рослини немає.

Результати оцінки інтенсивності мікоризної інфекції кореневої системи інфікованих рослин показують, що залежність між згаданими величинами та величинами КН ^{137}Cs рослинами соняшнику спостерігаються лише у разі вирощування останніх на супіщаному ґрунті в умовах вегетаційного досліді.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика ефективності передпосівного внесення арбускулярних мікоризних грибів *Funneliformis mosseae* у ґрунт при вирощуванні соняшнику (в середньому за 2 роки, 2009–2010 рр.). n=4. Польовий дослід¹⁾

Варіанти досліді	Плоди	Листки і стебла
	Біомаса, г/м ² , с.в.	
АМ+	16,0±8,83	894,8±406,6
АМ–	13,9±7,13	719,8±409,5
Контроль	11,6±8,30	785,0±272,4
	^{137}Cs , Бк/кг с.в.	
АМ+	105,0±61,2	328,5±220,4
АМ–	123,2±66,4	333,3±222,7
Контроль	154,8±55,1	401,7±213,1
	^{137}Cs КН ²⁾ ($\times 10^{-3}$)	
АМ+	29,5±18,8	95,1±71,3
АМ–	40,1±38,2	99,4±85,3
Контроль	40,2±18,7	109,1±75,1

Примітка: ¹⁾середньосуглинковий ґрунт, щільність забруднення за ^{137}Cs 832±53 кБк/м²; ²⁾ ^{137}Cs КН розраховували як відношення активності ^{137}Cs в рослині, Бк/кг с.в. до активності ^{137}Cs в ґрунті, Бк/кг с.в.

Отримані експериментальні дані добре узгоджуються з результатами інших досліджень. Відсутність ефекту від внесення АМ грибів у ґрунт при вирощуванні пажитниці багатоквіткової спостерігали у вегетаційних дослідіх Rosén і співавт., [14]. Згідно з результатами досліджень С. Дубчак [3], колонізація рослин АМ грибом *Glomus intraradices* (сучасна назва *Rhizophagus intraradices*), навпаки, зменшує надходження ^{137}Cs до надземних органів рослин.

Порівняння результатів вегетаційного і польового дослідів показує, що рослини, інокульовані АМ грибами, накопичують більше радіоцезію лише при вирощуванні їх на

супіщаному ґрунті в умовах вегетаційного дослідження, в інших випадках дослідні рослини накопичують радіонуклід у тих же кількостях, що і рослини контрольного варіанта в обох дослідженнях. Результати польових досліджень у даному разі є важливими, оскільки відомо, що мікоризний симбіоз, який утворюється в тепличних умовах вегетаційного дослідження, не обов'язково буде таким же в польових умовах [9]. Крім того, в умовах польових досліджень, на відміну від вегетаційних дослідів, можна очікувати наявності супутніх колонізацій. Як показано, у більшості випадків внесення грибів у ґрунт не сприяє посиленню переходу радіонукліда із ґрунту в рослини.

Причини, що пояснюють брак очікуваного ефекту, можуть бути різні. Як зазначалося вище, симбіотичні асоціації між ендомікоризними грибами та коренями рослин є найбільш поширеним типом мікоризи. Використання алохтонних "чужорідних" штамів, які сформувалися поза межами конкретної екосистеми, може не дати очікуваного ефекту. Відомо [4], що автохтонні "місцеві" арбускулярні гриби, виділені з ризосфери рослин у різних частинах 30-кілометрової зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення ЧАЕС, характеризувалися високими значеннями коефіцієнтів накопичення радіонуклідів. Зокрема, це види *Glomus geosporum* і *Glomus intraradices*. Чи впливають такі автохтонні штами на перехід радіонукліда з ґрунту в інфіковані ними мікоризні рослини? Як показано Linderman і Davis [11], деякі комбінації рослин та АМ грибів можуть бути більш вигідними для рослини-хазяїна, ніж інші, що є свідченням структурних і функціональних відмінностей не лише між видами, а й навіть між морфотипами одного і того ж виду грибів. Наведене вище дає підставу стверджувати, що позитивний ефект інокуляції може бути досягнутий лише у разі сумісності рослини-хазяїна й АМ гриба [13]. У цьому експерименті ми використовували комерційний інокулянт *Funneliformis mosseae*. Очевидно, що для досягнення кращих результатів важливо враховувати походження АМ грибів. Відомо, що внесення у ґрунт автохтонних (аборигенних) штамів грибів, які краще адаптовані до місцевих умов, ніж алохтонні, позитивно впливає не лише на продуктивність рослин, а й також на кількість грибних відростків у ґрунті [10].

Напрями подальших досліджень. З огляду на те, що результати досліджень стосовно можливостей використання АМ грибів у цілях фіторемедіації є суперечливими, варто було би дослідити роль чинників, які, очевидно, визначають вплив інокуляції на накопичення радіоцезію мікоризними рослинами.

Досліджуючи ефективність передпосівної інокуляції ґрунту арбускулярним мікоризним грибом *Funneliformis mosseae* при вирощуванні соняшнику в умовах вегетаційного і польового дослідів, встановили таке:

1. При передпосівному внесенні у ґрунт арбускулярного мікоризного гриба *Funneliformis mosseae* на ґрунтах із низьким рівнем радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи біомаса плодів, стебел і листків інокерованих рослин соняшнику (АМ+), що вирощувалися на супіщаному ґрунті, виявилась удвічі вищою ніж біомаса рослин контрольного варіанта і варіанта зі стерилізованим ґрунтом (АМ-). Ефект інокуляції на середньосуглинковому ґрунті в умовах вегетаційного та польового дослідів виявився менш помітним, тоді як внесення грибів у глинистий ґрунт у вегетаційному досліді не впливало на приріст листків і стебел досліджуваної культури.

2. Рослини соняшнику, що росли на інокерованому АМ грибами супіщаному ґрунті вегетаційного досліді, накопичували приблизно удвічі більше радіонукліда, ніж ті, що росли на контрольних варіантах. В умовах польового досліді внесення грибів у ґрунт не посилювало надходження радіонукліда в рослини.

3. Внесення у ґрунт алохтонних штамів арбускулярних мікоризних грибів при вирощуванні соняшнику з метою фітореMediaції радіоактивно забруднених земель не може бути рекомендовано.

Автор висловлює подяку проф. А. Мортенссон, д-ру К. Розену та д-ру Б. Недрі за сприяння у проведенні експериментів і визначенні інтенсивності мікоризної інфекції. Фінансову підтримку проекту надано Шведським університетом сільськогосподарських наук.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вінчук М. М. Радіоекологічні функції арбускулярних мікоризних грибів // Вісн. Запорізьк. ун-ту. Сер. біол. науки. 2014. Т. 1. С. 164–172.
2. Вінчук М. М. Арбускулярні мікоризні гриби та їх вплив на перехід радіоцезію з ґрунту у рослини // Наук. вісн. Східноєвроп. ун-ту. Біол. науки. 2015. 2(302). С. 11–17.
3. Дубчак С. В. Роль арбускулярних мікоризних грибів у накопиченні ^{137}Cs рослинами та перспективи їх використання у фітореMediaції ґрунтів // Радіоекологія–2014: матеріали наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Київ, 24–26 квітня 2014 р.). Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2014. С. 125–130.
4. Крінка Г. В. Використання арбускулярних мікоризних грибів у фітореMediaції ґрунтів від радіонуклідів: автореф. дис. ... канд. біол. наук: 03.00.20. К., 2005. 21 с.
5. Bakken L. R., Olsen R. A. Accumulation of radiocaesium in fungi // Can. J. Microbiol. 1990. Vol. 36. P. 704–710.
6. Declerck S., Dupré de Boulois H., Bivort C., Delvaux B. Extraradical mycelium of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus lamellosum* can take up, accumulate and translocate radiocaesium under root-organ culture conditions // Environ. Microbiol. 2003. Vol. 5. P. 510–516.
7. Dubchak S., Ogar D., Mietelski J. W., Turnau K. Influence of silver and titanium nanoparticles on arbuscular mycorrhiza colonization and accumulation of radiocaesium in *Helianthus annuus* // Span. J. Agric. Res. 2010. Vol. 8. N 1. P. 103–108.
8. Entry J. A., Astrud L. S., Reeves M. Accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr from contaminated soil by three grass species inoculated with mycorrhizal fungi // Environ. Pollut. 1999. Vol. 104. P. 449–457.
9. Harley J. C., Smith S. E. Mycological Symbiosis. London: Academic Press., 1983. 483 pp.
10. Johnson N. C., Wilson G. W. T., Bowker M. A. et al. Resource limitation is a driver of local adaptation in mycorrhizal symbioses // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2010. Vol. 107. P. 2093–2098.
11. Linderman R. G., Davis E. A. Varied response of marigold (*Tagetes* spp.) genotypes to inoculation with different arbuscular mycorrhizal fungi // Scientia Horticulturae (Canterbury, Engl.). 2004. Vol. 99. P. 67–78.
12. Rogers R. D., Williams S. E. Vesicular Arbuscular Mycorrhiza – Influence on Plant Uptake of Cesium and Cobalt // Soil Biol. Biochem 1986. Vol. 18. P. 371–376.
13. Rodríguez Y. B., de la Noval, Fernández F., Rodríguez P. Estudio comparativo del comportamiento de seis cepas de hongos micorrízicos arbusculares en su interacción con el tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. var. Amalia) // Ecología Aplicada. 2004. Vol. 3. P. 162–171.
14. Rosén K., Weiliang Z., Mårtensson A. Arbuscular mycorrhizal fungi mediated uptake of ^{137}Cs in leek and ryegrass // Sci. Total Environ. 2005. Vol. 338. P. 283–290.
15. Sorochinsky B. V., Mikheev A. N., Kuchko M. V., Prokhrevsky A. T. Decontamination of small water reservoirs of the 10-km zone of Chernobyl NPP by rhizofiltration. In Problems of Chernobyl Exclusion Zone. Naukova Dumka, Kyiv: 1998. Pp. 97–102.

16. Soudek P., Valenová S., Vavříková Z., Vaneš T. ^{137}Cs and ^{90}Sr uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions // J. Environ. Radioactiv. 2006. Vol. 88. P. 236–250.
17. Vinichuk M. M., Johansson K. J. Accumulation of ^{137}Cs by fungal mycelium in forest ecosystems of Ukraine // J. Environ. Radioactiv. 2003. Vol. 64. N 1. P. 27–43.
18. Vinichuk M. M., Rosén K., Dahlberg A. ^{137}Cs in fungal sporocarps in relation to vegetation in a bog, pine swamp and forest along a transect // Chemosphere. 2013. Vol. 90. P. 713–720.
19. Vinichuk M. M., Mårtensson A., Ericsson T., Rosén K. Effect of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on ^{137}Cs uptake by plants grown on different soils // J. Environ. Radioactiv. 2013a. Vol. 115. P. 151–156.
20. Vinichuk M., Mårtensson A., Rosén K. Inoculation with arbuscular mycorrhizae does not improve ^{137}Cs uptake in crops grown in the Chernobyl region // J. Environ. Radioactiv. 2013b. Vol. 126. P. 14–19.

Стаття: надійшла до редакції 22.12.15

доопрацьована 17.03.16

прийнята до друку 20.04.16

SUNFLOWER MICORIZATION BY ARBUSCULAR MYCORRHIZAL FUNGUS *FUNNELIFORMIS MOSSEAE* AND ITS IMPACT ON RADICESIUM UPTAKE BY PLANTS

M. Vinichuk

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

The effect of soil inoculation with arbuscular mycorrhizal (AM) fungus *Funneliformis mosseae* on sunflower biomass and ^{137}Cs uptake was investigated in both the pot and field experiments. Experimental soil types in pot experiment were sandy, loamy and clay and soil in field experiment was loamy soil. It is appeared that inoculated sunflower plants had 2 times higher biomass (fruits, leaves and stems) and 2 times higher levels of ^{137}Cs uptake when grown in pot experiment on sandy soil. ^{137}Cs uptake by sunflower plants growing on sandy soil in pot experiment well and significantly correlated with an infection intensity of fine roots. Increased yield and higher radionuclide transfer from soil to plants due to inoculation were less apparent when grown in pot experiment on loamy soils. No effects of inoculation was found when plants were growing on clay soil in pot experiment as well as on loamy soil in field experiment – sunflower plants on inoculated soil had similar yield and ^{137}Cs uptake to those plants growing on control without treatment.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi, soil, inoculation, sunflower, radiocesium.

**МИКОРИЗАЦИЯ ПОДСОЛНЕЧНИКА АРБУСКУЛЯРНЫМ МИКОРИЗНЫМ
ГРИБОМ *FUNNELIFORMIS MOSSEAE* И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПЕРЕХОД
РАДИОЦЕЗИЯ ИЗ ПОЧВЫ В РАСТЕНИЯ**

М. Винчук

*Житомирский государственный технологический университет
ул. Черняховского, 103, Житомир 10005, Украина
e-mail: mykhailo59@gmail.com*

Исследовано влияние инокуляции почвы арбускулярным микоризным (АМ) грибом *Funneliformis mosseae* при выращивании растений подсолнечника на величину перехода ^{137}Cs из почвы в растения в условиях вегетационного и полевого опытов. В условиях вегетационного опыта использовали супесчаную, среднесуглинистую и глинистую почву, а в полевом опыте – среднесуглинистую. Установлено, что инфицированные растения подсолнечника, по сравнению с растениями контрольного варианта, имели в 2 раза более высокую продуктивность (плоды, листья и стебли), а также в 2 раза выше коэффициенты накопления (КН) ^{137}Cs при выращивании их в условиях вегетационного опыта на супесчаной почве. Между значениями коэффициентов накопления ^{137}Cs растениями подсолнечника и интенсивностью микоризной инфекции боковых корней растений, выращиваемых на супесчаной почве в условиях вегетационного опыта, существует тесная статистически достоверная корреляционная зависимость. Прирост урожая и повышение уровня перехода радионуклида из почвы в растения в результате инокуляции были менее очевидными при выращивании их в условиях вегетационного опыта на среднесуглинистой почве. При выращивании растений на глинистой почве в условиях вегетационного опыта и на среднесуглинистой почве в полевом опыте значения продуктивности и коэффициенты накопления ^{137}Cs инокулированных растений были на уровне растений контрольного варианта.

Ключевые слова: арбускулярные микоризные грибы, почва, инокуляция, подсолнечник, радиоцезий.