

УДК 581.557.24: 546.36: 631.95

ЕНВАЙРОНМЕНТАЛЬНО-БІОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ В ЗЕМЛЕРОБСТВІ НА РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ

О.І. Дутов, С.В. Дубчак, О.П. Войтович

Енвайронментально-біологічні підходи в землеробстві на радіоактивно забруднених територіях. — О. І. Дутов¹, С. В. Дубчак¹, О. П. Войтович². — Розглянуто сучасні енвайронментально-біологічні підходи до підбору польових сільськогосподарських культур для культивування на радіоактивно забруднених територіях. Встановлено, що насиченням сівозмін сільськогосподарськими культурами, які відрізняються потенційно невисокою здатністю до накопичення ¹³⁷Cs, можна значно розширити ареал використання радіоактивно забруднених земель для виробництва гарантовано безпечної продукції. Проаналізовано вплив арбускулярних мікоризних грибів на надходження радіоцезію до рослин. Виявлено здатність арбускулярної мікоризи суттєво модифікувати накопичення радіоцезію сільськогосподарськими культурами.

Ключові слова: екологізація землеробства, радіоцезій, сільськогосподарські культури, радіоактивно забруднені території, арбускулярні мікоризні гриби, мікоризна колонізація

Адреса: ¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, м.Київ; ²Рівненський державний гуманітарний університет, м. Рівне. **

Environmental and biological approaches in agriculture at radioactively contaminated areas. — O. I. Dutov, S. V. Dubchak, O. P. Vojtovich. — The modern environmental and biological approaches to the selection of field agricultural crops for cultivation at contaminated areas are considered. It is established, that the satiation of rotations with agricultural crops differed by potentially low capacity to accumulate ¹³⁷Cs, can significantly extend the areal of radioactively contaminated lands use for production of guaranteed safe products. The influence of arbuscular mycorrhizal fungi on radiocaesium uptake by plants is analyzed. The ability of arbuscular mycorrhiza to modify significantly radiocaesium accumulation by agricultural crops is found.

Keywords: greening of agriculture, radiocaesium, agricultural crops, radioactively contaminated areas, arbuscular mycorrhizal fungi, mycorrhizal colonization

Вступ

Після припинення викидів радіоактивних речовин у навколишнє природне середовище радіоактивний цезій залишається найбільш біологічно значущим полунуклідом, що визначає ступень радіаційної небезпеки населення. Переважним шляхом його потрапляння до організму людини є надходження з сільськогосподарською продукцією, що виробляється на радіоактивно забруднених територіях. Зазначена парадигма підтверджена як досвідом подолання наслідків аварії на Чорнобильській АЕС (1986 р.), так і на АЕС «Фукусіма» (2011 р.) [1, 2, 3]. Тому ведення землеробства в цих умовах передбачає впровадження комплексу протирадіаційних заходів ґрунтово-агрохімічного спрямування, метою яких є зменшення дози опромінення населення шляхом забезпечення виробництва гарантовано радіоекологічно безпечної сільськогосподарської продукції [4, 5, 6].

Останнім часом значна увага приділяється екологізації землеробства, зокрема енвайронментальним біотехнологіям, які спрямовані на комбіноване використання рослин та певних видів ґрунтових мікроорганізмів [7]. Серед таких мікроорганізмів особливе значення мають арбускулярні мікоризні

(АМ) гриби, оскільки близько 90 % рослин формують з ними симбіотичні зв'язки, утворюючи мікоризні асоціації [8]. Поряд зі збереженням і підвищенням родючості ґрунту, застосування АМ грибів значно зменшує хімічне навантаження на навколишнє природне середовище і населення, що є особливо актуальним на територіях, забруднених після ядерних та радіаційних інцидентів.

Матеріали та методи

Питому активність ¹³⁷Cs та ¹³⁴Cs у підземних і надземних частинах досліджуваних рослин визначали на напівпровідниковому гамма-спектрометрі з HP-Ge детектором (відносна ефективність 15 %, роздільна здатність 2,5 кеВ для енергії 1,33 МеВ).

Рослини в лабораторних дослідах було культивовано на ґрунті з штучно внесеним та гомогенно розподіленим ¹³⁴Cs, питома активність якого була 77000 Бк·кг⁻¹.

Для оцінки накопичення радіонуклідів у врожаї за різної щільності забруднення ґрунту використовували коефіцієнт переходу (КП) радіоцезію з ґрунту до рослин – вміст радіонукліду в рослині при щільності забруднення ґрунту, що дорівнює

одиниці (Бк/кг повітряно-сухої маси рослин) / (кБк/м² ґрунту) та коефіцієнт накопичення (КН) – відношення питомої активності радіонукліду в повітряно-сухий масі рослин до питомої активності радіонукліду в ґрунті (Бк/кг повітряно-сухої маси рослин) / (Бк/кг ґрунту).

Рівні колонізації рослин АМ грибами визначали за допомогою світлового мікроскопу Nikon Eclipse 800 (Японія) з системою фотореєстрації Nikon FDX-35. Коріння рослин фарбували розчином 0,01 % блакитного аніліну та 80 % молочної кислоти. Кількісний аналіз мікоризної колонізації рослин внутрішньокореновими структурами АМ грибів проводили за методом Трувелота [9], з використанням шестирівневої шкали колонізації.

Виміри концентрації стабільних металів (K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Cs, Y і Pb) у надземних і підземних частинах рослин та ґрунті проводили з використанням методу флуоресцентного аналізу з повним рентгенівським відбиттям (TXRF-аналіз).

Результати досліджень

Енвайронментально-біологічні підходи до підбору сільськогосподарських культур в землеробстві на радіоактивно забруднених територіях базуються на їх потенційній здатності до накопичення радіонуклідів. За даними, наведеними на рис. 1, видно, що за потенційною здатністю до накопичення ¹³⁷Cs в товарній частині рослин польові сільськогосподарські культури можна розділити на три умовні групи.

Найменшим накопиченням ¹³⁷Cs в урожаї відрізнялася кукурудза, коефіцієнт переходу радіонукліду в зерно якої становив 0,07 (Бк/кг)/(кБк/м²). Максимальний вміст радіоцезію в межах групи зернових злакових культур був характерним для зерна вівса. Вміст ¹³⁷Cs в ньому був в 5 разів вищий, ніж у зерні кукурудзи.

До групи культур з потенційно невисокою здатністю до накопичення ¹³⁷Cs відноситься і картопля. Коефіцієнт переходу радіонукліду в її бульби займає проміжне положення між пшеницею озимою і ячменем, але є на 71% вищим, ніж для зерна кукурудзи.

Більш високим потенційним накопиченням радіонукліду відрізнялася група круп'яних культур. Якщо вміст радіоцезію в просі спостерігається на рівні озимого жита, то в зерні гречці він був у 3 рази вищим. Проте максимальне накопичення ¹³⁷Cs є характерним для групи зернових бобових культур. Зокрема, в рослинах гороху цей показник був у 13 разів вищим у порівнянні з кукурудзою.

З огляду на викладене, слід зауважити, що використовуючи підбір і насичення сівозмін сільськогосподарськими культурами, які відрізняються потенційно невисокою здатністю до накопичення радіоцезію, можна значно розширити ареал використання радіоактивно забруднених земель для

виробництва продукції, що буде гарантовано відповідати чинним гігієнічним нормативам.

Для вивчення впливу арбускулярних мікоризних (АМ) грибів на накопичення радіоцезію сільськогосподарськими культурами в лабораторних умовах було вибрано рослини люцерни (*Medicago truncatula*) та соняшника (*Helianthus annuus*). В якості інокулянта використано АМ гриб *Glomus intraradices* (штам ВІО; компанія BIORIZE, м.Діжон, Франція), який є широко розповсюдженим в різних типах ґрунтів та виявляє високу колонізаційну здатність у симбіозі з багатьма видами рослин [10].

Отримані результати свідчать про здатність арбускулярної мікоризи суттєво модифікувати накопичення радіоцезію рослинами. Зокрема, інокуляція АМ грибом *G. intraradices* призвела до зменшення на 52 % коефіцієнту накопичення ¹³⁴Cs в надземних органах люцерни у порівнянні з немікоризованим контролем. Водночас мікоризовані рослини люцерни акумулювали в корінні на 19 % більше ¹³⁴Cs, ніж немікоризовані (табл.1). Таким чином, наявність арбускулярного мікоризного симбіозу призвела до збільшення на 80 % співвідношення між питомою активністю ¹³⁴Cs у підземних та надземних частинах рослин люцерни, а отже – до зменшення переносу радіонукліду з кореневої системи до надземних органів.

Протилежний ефект від впливу арбускулярної мікоризи спостерігався у соняшника звичайного, де в надземній та підземній частинах інокульованих АМ грибом рослин було відмічено майже десятикратне зростання коефіцієнтів накопичення ¹³⁴Cs у порівнянні з контролем (з 0,50 до 4,92 в кореневій системі та з 0,34 до 3,19 в надземних органах). Мікоризовані рослини цього виду виявили гіперакумулюючу здатність стосовно ¹³⁴Cs, поглинувши за тримісячний період культивування відносно велику (0,22 – 0,27 %) частину радіонукліду з ґрунту.

Слід зазначити, що механізми, за допомогою яких АМ гриби здатні утримувати радіоцезій та інші радіонукліди у своїх структурах і обмежувати або збільшувати їх надходження до рослин, докладно не вивчені. На сьогодні відомо два основні процеси: 1) утворення АМ грибом сполук, які переводять полютант у ґрунті в необмінну форму, іноді з його фіксацією на зовнішній поверхні міцелію та 2) компартменталізація - переміщення поглинутого полютанта до найбільш стійких до його впливу органів АМ гриба або до внутрішньоклітинного простору з подальшою ізоляцією від цитоплазми та депонуванням [11].

Мікоризовані рослини люцерни і соняшника, культивовані на ґрунті з ¹³⁴Cs та «контрольному» ґрунті характеризувалися значними рівнями АМ колонізації (84 – 98 %). Колонізація фрагментів коріння рослин була однорідною, а внутрішньокореневі структури АМ гриба *G. intraradices* утворювали Агum-тип мікоризи (рис. 2).

Таблиця 1. Вплив арбускулярної мікоризації на накопичення ^{134}Cs в люцерні (*Medicago truncatula*) та соняшнику (*Helianthus annuus*)

	Питома активність, Бк·кг ⁻¹		Активність в рослині, Бк/рослину		Коефіцієнт накопичення		Співвідношення активності, підз./надз. частина
	підз. част.	надз. част.	підз. част.	надз. част.	підз. част.	надз. част.	
<i>Medicago truncatula</i>							
НМ	106400 ± 19986a	132100 ± 15505b	2.3 ± 0.2a	12.3 ± 0.6b	1.38 ± 0.21a	1.72 ± 0.20b	0.81 ± 0.28a
М	126441 ± 11463b	86888 ± 20022a	3.1 ± 0.1b	9.3 ± 0.6a	1.64 ± 0.15b	1.13 ± 0.26a	1.45 ± 0.41b
<i>Helianthus annuus</i>							
НМ	38412 ± 3933a	26202 ± 1147a	0.4 ± 0.1a	6.4 ± 1.8a	0,50 ± 0.05a	0,34 ± 0.04a	1.47 ± 0.21a
М	378932 ± 10233b	245353 ± 4502b	6.5 ± 1.2b	104.1 ± 4.6b	4,92 ± 0.08b	3,19 ± 0.06b	1.54 ± 0.10a

* - різні літери над величинами в таблиці позначають статистично істотні різниці між мікоризованими та немікоризованими рослинами ($p < 0,05$).

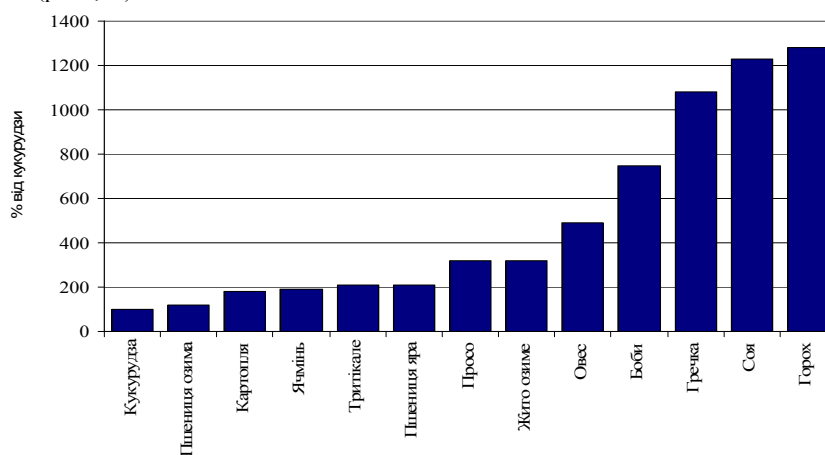


Рис. 1. Відносне накопичення ^{137}Cs польовими культурами, % від кукурудзи

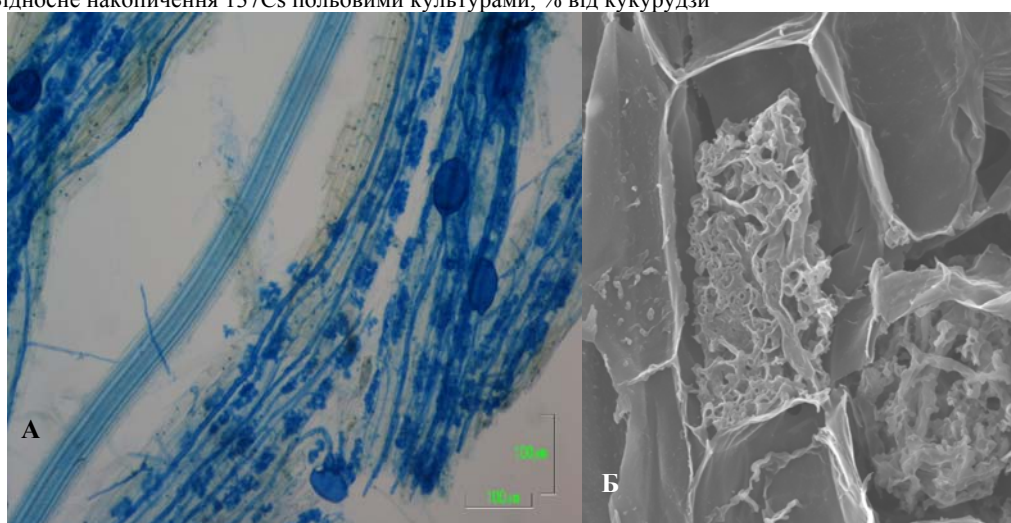


Рис. 2. Арбускули та везикули АМ гриба *G. intraradices* в корінні люцерни

(А - фото зі світлового мікроскопу) та арбускули в клітинах кортикального шару коріння соняшника (В – фото з електронного мікроскопу, x2000)

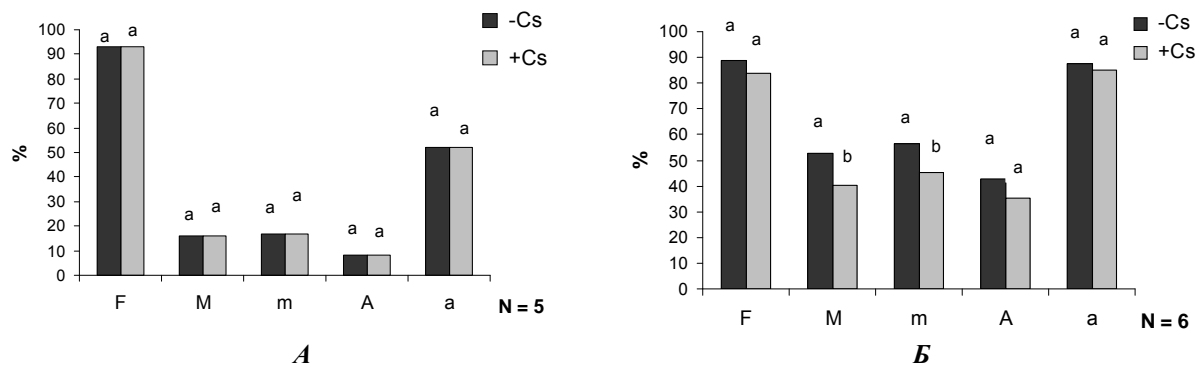


Рис. 3. Параметри арбускулярної мікоризної колонізації кореневої системи рослин люцерни (А) та соняшника (В) грибом *G. intraradices*, культивованих на ґрунті з ^{134}Cs («+ Cs») та без радіоцезію («- Cs»), %

F – загальний ступінь колонізації; M, m – інтенсивність мікоризної колонізації (загальна та в мікоризованих фрагментах коріння відповідно); A, a – вміст арбускул (загальний та в мікоризованих фрагментах коріння з арбускулами відповідно)

Слід зауважити, що присутність радіоцезію у ґрунті не вплинула на параметри АМ колонізації соняшника і водночас призвела до певного зменшення (на 10–12 %) показників інтенсивності мікоризної колонізації (M та m) у випадку люцерни.

Високий вміст арбускул у колонізованому корінні усіх видів рослин (52 – 89 %) свідчить про ефективне функціонування та хороший якісний стан мікоризи. За даними, наведеними на рис. 3, видно, що параметри АМ колонізації коріння люцерни були значно вищі від соняшника.

Висновки

Енвайронментально-біологічні підходи в землеробстві на радіоактивно забруднених територіях передбачають більш повне використання потенційної здатності сільськогосподарських рослин накопичувати радіонукліди та застосування певних видів ґрунтових мікроорганізмів, що зменшує хі-

мічне навантаження на агроєкосистеми, сприяє збереженню і відтворенню родючості забруднених ґрунтів.

АМ гриби виявляють здатність до трансформації та іммобілізації в своїх структурах радіоактивного цезію і обмежують його доступність до окремих видів рослин. Ефективність мікоризи в процесах переносу радіоцезію не визначається інтенсивністю АМ колонізації та демонструє залежність коефіцієнтів накопичення радіонукліду саме від біологічних особливостей рослин.

Потенційне використання АМ грибів для культивування певних видів сільськогосподарських культур на радіоактивно забруднених ґрунтах потребує більш повного вивчення з метою зменшення хімічного навантаження на довкілля за рахунок мінімізації внесення мінеральних добрив та біологізації землеробства.

1. Абаган А.А. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ / А. А. Абаган // Атомная энергия. – 1986. – Т. 61, вып. 5. – С. 301–320.
2. Національна доповідь України «25 років Чернобыльської катастрофи. Безпека майбутнього». – Київ: КІМ, 2011. – 395 С.
3. Hirose K. Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident: summary of regional radioactive deposition monitoring results / Hirose K. // J. Environ. Radioact. – 2012. – Vol. 111. – P.13–17.
4. Ведення сільськогосподарського виробництва на територіях, забруднених внаслідок Чернобыльської катастрофи у віддалений період (методичні рекомендації) / редкол.: Б.С. Пристер (голова) та ін. – Київ, : Атіка-Н, 2007. – 195 С.
5. Пристер Б.С. Проблемы сельскохозяйственной радиэкологии и радиобиологии при загрязнении окружающей среды молодыми смесями продуктов ядерного деления. – Чернобыль, К.: Книга, 2008. – 320 С.
6. Дутов О.І. Сучасні підходи до раціонального використання радіоактивно забруднених земель (на прикладі аварії на Чернобыльській АЕС) / О.І. Дутов // Агрохімія і ґрунтознавство.

7. 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 / Entry J.A., Astrud L.S., Reeves M. // Environ. Pollut. – 1999. – Vol. 104. – P. 449–457.
8. Smith S.E., Read D.J. Mycorrhizal Symbiosis. – Academic Press, San Diego: 1997. – 312 P.
9. Trouvelot A., Kough J.L., Gianinazzi-Pearson V. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle / In: Gianinazzi-Pearson, V., Gianinazzi, S. (Eds.) // Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae. – INRA Press. Paris. – P. 217–221.
10. Кріпка Г.В., Сорочинський Б.В. Отримання та випробування інокулятив арбускулярних мікоризних грибів з метою модифікації поглинання радіонуклідів рослинами / Кріпка Г.В., Сорочинський Б.В. // Зб. наукових праць Інституту ядерних досліджень. – 2003. – №2 (10). – С. 80–84.
11. Meharg A.A. The mechanistic basis of interactions between mycorrhizal associations and toxic metal cations. – Mycol. Res. – 2003. – Vol. 107. – P. 1253–1265.

Отримано: 8 липня 2014 р.

Прийнято до друку: 9 вересня 2014 р.