

УДК 631.8:633.15:504.054

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.145.2.37>

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕННЯ НА ПИТОМУ АКТИВНІСТЬ ¹³⁷CS, ⁴⁰K, ²²⁶RA ТА ²³²TH СІРОГО ЛІСОВОГО ҐРУНТУ ЗА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ

Разанов С.Ф. – д.с.-г.н.,

професор кафедри лісового та садово-парового господарства,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0002-4883-2696

Врадій О.І. – к.с.-г.н.,

доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0001-7383-3829

Алексеев О.О. – к.с.-г.н.,

доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища,

Вінницький національний аграрний університет

orcid.org/0000-0001-5807-4932

Крілевич В.Р. – аспірант кафедри сталого природокористування

та захисту довкілля,

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій

імені С.З. Гжицького

orcid.org/0009-0006-0063-6350

Досліджено вплив внесення мінеральних добрив на питому активність цезію-137 (¹³⁷Cs), калію-40 (⁴⁰K), радію-226 (²²⁶Ra) і торію-232 (²³²Th) у сірому лісовому ґрунті при вирощуванні кукурудзи. Актуальність дослідження зумовлена значним впливом техногенних та агрохімічних чинників на агроєкосистеми України, що призводить до накопичення радіонуклідів у ґрунтах і сільськогосподарській продукції. Хоча кукурудза має відносно низьку здатність до накопичення радіонуклідів, особливо в зерні, що робить її однією з найбезпечніших культур для вирощування на радіаційно забруднених територіях. Сірі лісові ґрунти Лісостепу мають специфічні властивості, що сприяють міграції та акумуляції радіонуклідів. До таких властивостей належать: низький вміст гумусу, кисла реакція середовища, та легкий гранулометричний склад.

Метою дослідження було розрахувати надходження у сірий лісовий ґрунт за різних доз удобрення при вирощуванні кукурудзи сорту «Фіона». Дослідження проводили на ділянках сірого лісового ґрунту Лісостепу Правобережного України. Було застосовано два рівні удобрення, що відповідали запланованій урожайності кукурудзи: 32 ц/га (норма внесення N₇₀P₈₀K₇₀) та 80 ц/га (норма N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀). Мінеральні добрива включали аміачну селітру, подвійний суперфосфат та хлористий калій. Питому активність радіонуклідів (¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th) в мінеральних добривах визначали гамма-спектрометричним методом у радіоекологічній лабораторії Інституту сільського господарства Полісся НААН України.

Результати досліджень показали, що мінеральні добрива є джерелом радіонуклідів, особливо калійні. Найвищу питому активність усіх чотирьох радіоізотопів виявлено у хлористому калію: ¹³⁷Cs – 26,8 Бк/кг, ⁴⁰K – 16400 Бк/кг, ²²⁶Ra – 19,4 Бк/кг та ²³²Th – 9,9 Бк/кг. Загальна кількість радіонуклідів, що надходить у ґрунт із добривами, значно зростала зі збільшенням норми їх внесення. При запланованій урожайності 32 ц/га, до ґрунту потрапляло 3,9 млн Бк/га сумарної активності радіонуклідів, тоді як при урожайності 80 ц/га – 5,2 млн Бк/га. Найбільший внесок у загальне радіонуклідне забруднення ґрунту робить хлористий калій, з якого надходить понад 63% загальної кількості радіонуклідів. Із загальної кількості радіоізотопів, що надходять у ґрунт з добривами, найбільшу частку становить

природний ізотоп калій-40 (^{40}K) – до 60,3% при меншій нормі добрив та до 63,4% при вищій нормі.

За результатами дослідження зроблено висновок, що при вирощуванні кукурудзи найбільша кількість радіонуклідів, що надходить у ґрунт з мінеральними добривами, припадає на природний ізотоп ^{40}K . Послідовність надходження радіонуклідів у ґрунт за зростанням питомої активності така: $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{40}\text{K}$.

Ключові слова: сірий лісовий ґрунт, мінеральні добрива, радіонукліди, міграція, кукурудза.

Razanov S.F., Vradii O.I., Aliksieiev O.O., Krilevych V.R. Effect of mineral fertilizer on the specific activity of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th in gray forest soil during Zea cultivation

The effect of mineral fertilizer application on the specific activity of cesium-137 (^{137}Cs), potassium-40 (^{40}K), radium-226 (^{226}Ra) and thorium-232 (^{232}Th) in gray forest soil during Zea cultivation was investigated. The relevance of the study is due to the significant impact of technogenic and agrochemical factors on the agroecosystems of Ukraine, which leads to the accumulation of radionuclides in soils and agricultural products. Although Zea has a relatively low ability to accumulate radionuclides, especially in grain, which makes it one of the safest crops for growing in radiation-contaminated areas. Gray forest soils of the Forest-Steppe have specific properties that contribute to the migration and accumulation of radionuclides. These properties include: low humus content, acidic reaction of the environment, and light granulometric composition.

The aim of the study was to calculate the input into the gray forest soil at different doses of fertilizer when growing Zea of the "Fiona" variety. The study was conducted on areas of gray forest soil in the Forest-Steppe of the Right Bank of Ukraine. Two levels of fertilizer were applied, corresponding to the planned Zea yield: 32 c/ha (application rate $\text{N}_{70}\text{P}_{80}\text{K}_{70}$) and 80 c/ha (rate $\text{N}_{120}\text{P}_{120}\text{K}_{120}$). Mineral fertilizers included ammonium nitrate, double superphosphate and potassium chloride. The specific activity of radionuclides (^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) in mineral fertilizers was determined by gamma spectrometry in the radioecological laboratory of the Institute of Agriculture of the Polissya NAAS of Ukraine.

The results of the studies showed that mineral fertilizers are a source of radionuclides, especially potassium. The highest specific activity of all four radioisotopes was found in potassium chloride: ^{137}Cs – 26.8 Bq/kg, ^{40}K – 16400 Bq/kg, ^{226}Ra – 19.4 Bq/kg and ^{232}Th – 9.9 Bq/kg. The total amount of radionuclides entering the soil with fertilizers increased significantly with an increase in their application rate. With a planned yield of 32 c/ha, 3.9 million Bq/ha of total radionuclide activity entered the soil, while with a yield of 80 c/ha – 5.2 million Bq/ha. The greatest contribution to the total radionuclide contamination of the soil is made by potassium chloride, from which more than 63% of the total amount of radionuclides comes. Of the total number of radioisotopes entering the soil with fertilizers, the largest share is the natural isotope potassium-40 (^{40}K) – up to 60.3% with a lower rate of fertilizers and up to 63.4% with a higher rate.

The results of the study concluded that when growing corn, the largest number of radionuclides entering the soil with mineral fertilizers falls on the natural isotope ^{40}K . The sequence of radionuclides entering the soil in increasing specific activity is as follows: $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{40}\text{K}$.

Key words: gray forest soil, mineral fertilizers, radionuclides, migration, corn.

Постановка проблеми. Сучасне сільське господарство України неможливе без застосування мінеральних добрив, що є основним фактором підвищення урожайності провідних культур, зокрема кукурудзи. Проте поряд із позитивними ефектами інтенсифікації землеробства актуалізується проблема екологічної безпеки агроєкосистем, зумовлена можливим накопиченням у ґрунті та рослинній продукції природних та техногенних радіонуклідів (^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) [1].

Сірі лісові ґрунти Лісостепової зони, де активно вирощується кукурудза, характеризуються високою здатністю акумулювати та трансформувати важкі метали і радіонукліди. Це створює потенційну небезпеку їхнього переходу з ґрунту в рослини та подальшого потрапляння в харчові ланцюги [16].

Сірі лісові ґрунти накопичують радіонукліди, такі як цезій-137 і стронцій-90, за допомогою механізму сорбції (поглинання). Цей процес залежить від їхніх

фізико-хімічних властивостей, зокрема низького вмісту гумусу, кислої реакції середовища та гранулометричного складу [14].

Сорбція – це процес поглинання радіонуклідів твердою фазою ґрунту. Для сірих лісових ґрунтів це відбувається в кілька етапів: осадження: після радіоактивних опадів основна частина радіонуклідів осідає на поверхні ґрунту або лісової підстилки; вертикальна міграція: з часом, під впливом опадів, розчинення та біогенних процесів (діяльність мікроорганізмів, переміщення корінням рослин), радіонукліди поступово переміщуються вглиб ґрунтового профілю, але зі швидкістю, яка зазвичай становить 1–3 см на рік; фіксація: у мінеральних шарах ґрунту радіонукліди, особливо цезій-137, фіксуються в кристалічних ґратках глинистих мінералів (наприклад, гідролюд), стаючи менш доступними для рослин [15].

Накопичення радіонуклідів у сірих лісових ґрунтах має свої особливості через їхні специфічні властивості: кислотність (рН): сірі лісові ґрунти мають кислу реакцію. У таких умовах рухливість цезію-137 зростає, оскільки конкуренція з іонами калію за місця поглинання в ґрунтовому комплексі зменшується. Це може призводити до його вимивання у ґрунтові води. Вміст гумусу: ці ґрунти характеризуються низьким вмістом гумусу, що знижує їхню сорбційну ємність. Органічна речовина ґрунту сприяє зв'язуванню радіонуклідів, тому її низький вміст у сірих лісових ґрунтах може бути фактором, що сприяє їхній міграції. Гранулометричний склад: сірі лісові ґрунти мають відносно легкий гранулометричний склад (суглинки, піщані суглинки), що сприяє швидшій фільтрації води та міграції радіонуклідів порівняно з важкими глинистими ґрунтами. Лісова підстилка: у лісових екосистемах значна частина радіонуклідів накопичується у верхньому шарі – лісовій підстилці, яка виступає як потужний акумулятор, перш ніж радіонукліди почнуть проникати в мінеральну товщу ґрунту [13].

Наукові дані щодо впливу різних норм мінеральних добрив на інтенсивність міграції ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra та ^{232}Th у ґрунт залишаються обмеженими та суперечливими. Відсутність комплексних досліджень ускладнює вироблення екологічно безпечних рекомендацій для агровиробництва [14].

Накопичення радіонуклідів (перш за все, цезію-137 та стронцію-90) відбувається через кореневу систему рослин. Рослини поглинають їх, оскільки ці радіоактивні елементи є хімічними аналогами важливих для їхнього росту мікроелементів [12].

Однак, кукурудза має фізіологічні особливості, які обмежують цей процес. Вона відрізняється від інших культур (наприклад, гороху або буряка) тим, що її коренева система менше поглинає радіонукліди, а більша частина поглинутих елементів залишається в стеблах і листках, а не переноситься в зерно. Цей механізм захисту робить зерно кукурудзи значно чистішим, ніж зерно багатьох інших зернових і бобових культур [8].

Внесення мінеральних добрив, зокрема калійних і фосфорних, значно знижує накопичення радіонуклідів, таких як цезій-137 і стронцій-90, в ґрунті та рослинах. Цей ефект досягається завдяки конкуренції між іонами поживних речовин і радіонуклідами за поглинання рослинами [9].

Основний механізм полягає в тому, що деякі радіонукліди є хімічними аналогами важливих для рослин елементів живлення. Цезій-137 є хімічним аналогом калію. При достатньому вмісті калію в ґрунті, рослини переважно поглинають його, а не радіоактивний цезій. Велика концентрація доступного калію «розбавляє» цезій, роблячи його менш доступним для кореневої системи. Це може зменшити накопичення цезію-137 врожаєм у 2–20 разів, залежно від типу ґрунту та

дози внесення добрив. Стронцій-90 є хімічним аналогом кальцію. Застосування фосфорних добрив призводить до утворення в ґрунті важкорозчинних сполук стронцію-90 з фосфатами, що робить його недоступним для поглинання рослинами. Додатково, фосфорні добрива стимулюють розвиток кореневої системи, що також підвищує загальну продуктивність рослин. Внесення вапна, яке містить кальцій, також знижує поглинання стронцію-90 [2].

Крім зменшення поглинання рослинами, мінеральні добрива впливають на міграцію радіонуклідів в ґрунтовому профілі. Вони можуть сприяти фіксації радіонуклідів, особливо в глинистих ґрунтах. Це призводить до закріплення радіонуклідів у верхніх шарах ґрунту, обмежуючи їхній подальший рух у підґрунті води та знижуючи доступність для рослин [3].

Використання мінеральних добрив є одним із найефективніших і широко застосовуваних агротехнічних методів для зниження радіаційного забруднення сільськогосподарської продукції на територіях, що постраждали від радіоактивних опадів [5].

В Україні діють Державні гігієнічні нормативи «Допустимі рівні вмісту радіонуклідів (^{137}Cs та ^{90}Sr) у продуктах харчування та питній воді» (ДР-2006). Ці норми встановлюють максимальну кількість радіонуклідів, що може міститися в продуктах, призначених для споживання людиною та тваринами. Для кукурудзи та продуктів її переробки, допустимі рівні вмісту радіонуклідів є одними з найнижчих серед зернових культур, що підкреслює її відносну «чистоту» [4].

На радіаційно забруднених територіях існують агротехнічні заходи, які додатково знижують накопичення радіонуклідів у кукурудзі: використання калійних добрив зменшує поглинання цезію-137, а фосфорних – стронцію-90.

Оранка на глибину 20–25 см допомагає «заховати» радіонукліди у нижніх шарах ґрунту, що знижує їх доступність для кореневої системи рослини. Вибір гібридів кукурудзи, які мають меншу здатність до накопичення радіонуклідів [6].

Отже, постає необхідність вивчення закономірностей надходження і розподілу радіонуклідів у сірому лісовому ґрунті під впливом різних доз мінеральних добрив при вирощуванні кукурудзи як важливої продовольчої та кормової культури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує ряд наукових публікацій, що досліджують вплив мінеральних добрив на накопичення радіонуклідів у сільськогосподарських культурах, зокрема в кукурудзі. Дослідження, що безпосередньо стосуються сірих лісових ґрунтів, підтверджують ефективність цього агротехнічного прийому.

Однією з найважливіших тем у цій галузі є конкуренція між радіоактивним цезієм-137 та калієм-40, який є природним радіонуклідом, що накопичується в добривах. Внесення калійних добрив значно знижує поглинання рослиною цезію-137, оскільки калій є його хімічним аналогом. Дослідження показують, що при внесенні повного мінерального добрива з нормою $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$, накопичення цезію-137 в зерні кукурудзи може бути значно зменшене [14].

Вплив добрив на вміст торію-232 та радію-226 є менш вираженим. Торій і Радій відносяться до природних радіонуклідів, які завжди присутні в ґрунті. Застосування фосфорних добрив, які також можуть містити радій, може незначно підвищувати його концентрацію в ґрунті. Однак, за рахунок підвищення врожайності, питома активність цих радіонуклідів в одиниці маси продукції (зерна) зменшується. Це явище називається біологічним розбавленням [10].

Науковці відзначають, що довготривале застосування мінеральних добрив (50 років і більше) може впливати на загальний радіаційний фон ґрунтів, змінюючи

питому активність деяких радіоактивних ізотопів. Це є важливим фактором, який враховують при моніторингу сільськогосподарських угідь [11].

Загалом, наукові праці підтверджують, що застосування мінеральних добрив, зокрема калійних, є ефективним заходом для зменшення накопичення радіонуклідів у кукурудзі. Це особливо актуально для сірих лісових ґрунтів, які мають кисле середовище і низький вміст гумусу, що сприяє підвищеній рухливості радіонуклідів.

Рудавська Н. М. та Гук Р. М. [5] у своїй роботі підкреслюють, як мінеральні добрива впливають на продуктивність кукурудзи, що є ключовим у контексті біологічного розбавлення радіонуклідів.

Ілленко В. В. та Романовська О. Р. [6] у своїй праці хоч вона і стосується гороху, але надає важливу інформацію про механізми впливу добрив на поглинання радіоцезію, що також актуально для кукурудзи.

Господаренко Г. М. та ін. [7] аналізують, як тривале застосування добрив впливає на радіонукліди в ґрунті та зерні, що є релевантним для розуміння загальних процесів в агроценозах.

Ці роботи є частиною широкого спектру досліджень, що проводяться в Україні та світі з метою мінімізації негативного впливу радіаційного забруднення на сільськогосподарське виробництво.

Мета дослідження – проаналізувати інтенсивність накопичення ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra та ^{232}Th у сірому лісовому ґрунті залежно від внесення мінеральних добрив при вирощуванні кукурудзи сорту *Фіона*, базуючись на розрахунках для діапазону урожайності від 32 до 80 ц/га.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження проводили на дослідних ділянках сірого лісового ґрунту, розташованих у зоні Лісостепу Правобережного України. Як об'єкт дослідження використовували посіви кукурудзи сорту *Фіона*. Ґрунти характеризуються середнім рівнем забезпеченості поживними речовинами, слабокислою реакцією ґрунтового розчину та підвищеною чутливістю до радіонуклідного забруднення.

Для вивчення впливу внесення мінеральних добрив застосовували два рівні урожайності:

- мінімальний рівень урожайності (32 ц/га) – норма внесення добрив $\text{N}_{90}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$;
- максимальний рівень урожайності (80 ц/га) – норма внесення добрив $\text{N}_{120}\text{P}_{100}\text{K}_{100}$.

Вміст радіонуклідів у мінеральних добривах (^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) визначали гамма-спектрометричним методом на приладі γ -спектрометр СЕГ-05 у радіоекологічній лабораторії Інституту сільського господарства Полісся НААН України.

Визначали питому активність (Бк/кг) у ґрунті. Отримані результати опрацьовували методами дисперсійного аналізу з використанням програмного забезпечення Statistica 10.0.

Виклад основного матеріалу досліджень. Результати досліджень табл. 1 показали, що питома активність ^{137}Cs у аміачній селітрі, суперфосфату подвійному та калію хлористому була у межах від 2,5 Бк/кг до 26,8 Бк/кг, ^{40}K – від 26,8 Бк/кг до 16400 Бк/кг, ^{226}Ra – від 5,8 Бк/кг до 19,4 Бк/кг та ^{232}Th – від 4,6 Бк/кг до 9,9 Бк/кг. Найвищу питому активність ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra та ^{232}Th виявлено у каоїну хлористому, зокрема 26,8 Бк/кг, 16400 Бк/кг, 19,4 Бк/кг та 9,9 Бк/кг відповідно, порівняно з аміачною селітрою та суперфосфатом подвійним у калію хлористого був вищий вміст ^{137}Cs – у 10,7 рази та 2,1 рази, ^{40}K – у 612 раз та 21 раз, у ^{226}Ra – у 3,34 рази та 1,64 рази і ^{232}Th – у 2,1 рази та 1,65 рази відповідно.

Таблиця 1

Питома активність радіоізоотопів у мінеральних добривах, Бк/кг

Мінеральні добрива	Радіоізотопи			
	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th
Аміачна селітра	2,5	26,8	5,8	4,6
Суперфосфат подвійний	12,7	7850	11,8	6,0
Калій хлористий	26,8	16400	19,4	9,9

Норми внесення мінеральних добрив за мінімальної та максимальної врожайності складали для кукурудзи – $N_{70}P_{80}K_{70}$ і $N_{120}P_{120}K_{120}$. Вміст ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra та ²³²Th визначали гамма-спектрометричним методом на приладі (Гамма-спекторетр SEG-05).

За результатами досліджень (табл. 2 та 3) встановлено, що у сірий лісовий ґрунт за його удобрення мінеральними добривами при вирощуванні кукурудзи з запланованою урожайністю 32 ц/га і 80 ц/га потрапляє 3894964,1 Бк/га і 5196355,6 Бк/га (¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th).

Таблиця 2

Вплив мінеральних добрив на питому активність радіонуклідів у сірому лісовому ґрунті за вирощування кукурудзи при запланованій урожайності 32 ц/га, Бк/га

Мінеральні добрива	Діюча речовина, кг	Фактична маса, кг	Радіонукліди			
			¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th
Аміачна селітра	70	203	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th
Суперфосфат подвійний	80	160	507,5	5440,4	1177,4	933,8
Калій хлористий	70	117	2032	1256000	1888	960

При цьому з аміачною селітрою надходить 0,21% і 0,27%, 36,3% і 36,4% з суперфосфатом подвійним та в63,3% і 63,4% з калієм хлористим. Найвища сумарна кількість радіоактивних речовин таких, як ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th у ґрунті потрапляє з калієм хлористим порівняно з аміачною селітрою та суперфосфатом простим у 255,2 рази та 1,74 рази відповідно.

За вирощування кукурудзи із запланованою урожайністю насіння 32 ц/га призводить до надходження до сірого лісового ґрунту з аміачною селітрою (N_{70}), суперфосфатом подвійним (P_{80}) та калієм хлористим (K_{70}) 5675,1 Бк/га ¹³⁷Cs, 3180240,4 Бк/га – ⁴⁰K, 5335,2 Бк/га – ²²⁶Ra та 3052,1 Бк/га – ²³²Th відповідно.

Із загальної кількості радіоізоотопів з аміачною селітрою, суперфосфатом подвійним та калієм хлористим при запланованій урожайності зерна кукурудзи 32 ц/га у ґрунт надходить 8,9%, 38,8% та 55,2% – ¹³⁷Cs, 0,17%, 39,4% та 60,3% – ⁴⁰K, 22,0%, 35,3% та 42,5% – ²²⁶Ra і 30,5%, 31,4% та 37,9% – ²³²Th відповідно.

При запланованій врожайності зерна кукурудзи 80 ц/га до ґрунту надходить з аміачною селітрою (N_{120}), суперфосфатом подвійним (P_{120}) та калієм хлористим (K_{120}) 9278 Бк/га ¹³⁷Cs, 5173326,4 Бк/га – ⁴⁰K, 8730,4 Бк/га – ²²⁶Ra та 5020,8 Бк/га – ²³²Th відповідно (табл. 3).

Таблиця 3

**Вплив мінеральних добрив на питому активність радіонуклідів
у сірому лісовому ґрунті за вирощування кукурудзи
при запланованій урожайності 80 ц/га, Бк/га**

Мінеральні добрива	Діюча речовина, кг	Фактична маса, кг	Радіонукліди			
			¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th
Аміачна селітра	120	348	870	9326,4	2018,4	1600,8
Суперфосфат подвійний	120	240	3048	1884000	2832	1440
Калій хлористий	120	200	5360	3280000	3880	1980

Із загальної кількості радіоізоотопів з аміачною селітрою, суперфосфатом подвійним та калієм хлористим за запланованої врожайності зерна кукурудзи 80 ц/га у ґрунт потрапляє 9,3%, 32,8% та 57,7% – ¹³⁷Cs, 0,18%, 36,4% та 63,4% – ⁴⁰K, 23,1%, 32,4% та 44,4% – ²²⁶Ra і 31,8%, 28,6% та 39,4% – ²³²Th відповідно.

Висновки і пропозиції. Результати дослідження показують, що мінеральні добрива, особливо калійні, є джерелом радіонуклідів, які потрапляють у ґрунт при вирощуванні кукурудзи. Найбільшу питому активність серед чотирьох радіоізоотопів – цезію-137 (¹³⁷Cs), калію-40 (⁴⁰K), радію-226 (²²⁶Ra) і торію-232 (²³²Th) – було виявлено у хлористому калію.

Збільшення норми внесення добрив значно підвищує загальну кількість радіонуклідів, що потрапляють у ґрунт. Наприклад, при запланованій урожайності кукурудзи 32 ц/га (норма N₇₀P₈₀K₇₀) до ґрунту надходить 3,9 млн. Бк/га сумарної радіоактивності, тоді як при урожайності 80 ц/га (норма N₁₂₀P₁₂₀K₁₂₀) ця кількість зростає до 5,2 млн. Бк/га.

Хлористий калій є найбільшим джерелом радіонуклідів, що надходять у ґрунт близько 63% до загального забруднення. Найбільшу частку серед усіх ізоотопів становить природний ізоотоп калій-40 (⁴⁰K), який становить 60,3% при меншій нормі добрив і 63,4% при вищій. Послідовність надходження радіонуклідів у ґрунт за зростанням питомої активності виглядає так: ²³²Th → ²²⁶Ra → ¹³⁷Cs → ⁴⁰K.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Гончарук І.В., Гонтарук Я.В. Оцінка ефективності удобрення за схемами ґрунтового та позакореневого їх застосування при вирощуванні сільськогосподарських культур. *Бізнес Інформ*. 2024. № 11. С. 170-176. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-11-170-176>
2. Купчук І.М., Мельник О.С. Математичне моделювання впливу опромінення на продуктивність процесу вирощування рослинної продукції в гідропонній установці. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки*. 2024. № 1 (331). С. 83-88. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-331-14
3. Abdel Moamen O.A., Murad G.A., Hassan H.S. Adsorption mechanism and mass transfer modeling of cesium and europium ions adsorption onto hematite-loaded polyacrylamide-gel composite: Pore Volume and Surface Diffusion Model Approach. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2023. Vol. 112564 <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2023.112564>
4. Amos Mwalongo D., Haneklaus N., Carvalko F., Lisuma J., Kivevele T.T., Mtei K., M. Influence of phosphate fertilizers on the radioactivity of agricultural soils and tobacco plants in Kenya, Tanzania, and Uganda. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30 Issue 34. P. 1-20. doi:10.1007/s11356-023-27543-8

5. Рудавська Н.М., Гук Р.М. Вплив удобрення на формування врожаю гібридів кукурудзи. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2017. Вип. 61. С. 123-134.
6. Ілленко В. В., Романовська О. Р. Вплив мікробних добрив на накопичення ¹³⁷Cs рослинами гороху посівного. Селекція, генетика, сортовипробування та агротехнології культурних рослин: виклики та перспективи: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених і спеціалістів (25 квітня 2025 р., с. Центральне, Київська обл., Україна), 2025. С. 91.
7. Господаренко Г.М., Любич В.В., Олійник О.О. Анізотропні властивості питомої активності радіонуклідів ґрунту та зерна пшениці м'якої озимої за тривалого застосування добрив. *Збірник наукових праць Уманського національного університету*. 2022. Вип. 100. Ч. 2. С. 242-252.
8. Циганський В.І., Михайлюк О.С. Динамічні закономірності формування надземної біомаси рослин гібридів кукурудзи різної групи стиглості з позиції системи позакореневого живлення. *Сільське господарство та лісівництво*. 2024. № 2 (33). С. 76-89. DOI:10.37128/2707-5826-2024-2-7
9. Циганський В.І., Машенко В.В. Формування продуктивності кукурудзи залежно від оптимізації системи удобрення. *Сільське господарство та лісівництво*. 2024. № 1 (32). С. 27-39. DOI: 10.37128/2707-5826-2024-1-3
10. Дідур І., Алексєєв О., Лотоцький Р., Бальковський О. Вплив способу обробітку ґрунту на інтенсивність накопичення цезію-137 у вегетативній масі грятисти збірної (*Dactylis glomerata* L.). Вісник Львівського національного університету природокористування «Агрономія». 2024. № 28. С. 36-41. DOI: <https://doi.org/10.31734/agronomy2024.28.036>
11. Razanov S., Koruniak O., Dydiv A., Holubieva T., Symochko L., Balkovsky V., Alekseev O., Vradii O., Ohorodnichuk H., Polishchuk M., Kolisnyk O., Mazur O., Mazur O. Radioprotective and sorption properties of beespine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*. 2023. Vol. 13 (2). P. 71–76. DOI: <https://doi.org/10.31407/ijeess13.2>
12. Дідур І.М., Алексєєв О.О., Панцирева Г.В., Приймак Ю.С. Радіоекологічна оцінка сірого лісового ґрунту природних лук Лісостепу Правобережного після 37-річного періоду від аварії на Чорнобильській АЕС. *Вісник Сумського національного аграрного університету (Агрономія і біологія)*. 2024. Т. 58. № 4. С. 30-36. DOI: <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.4.5>
13. Дідур І.М., Панцирева Г.В., Алексєєв О.О., Приймак Ю.С., Міщенко Б.Д. Радіологічна оцінка дерново-опідзоленого піщаного ґрунту присадибних територій після 37-річного періоду аварії на Чорнобильській АЕС. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2024. № 139. Ч. 1. С. 251-257. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.1.33>
14. Куценко М.І. Інтенсивність накопичення радіонуклідів вегетативною масою фацелії пижмолистої. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2024. Ч. 1 № 139. С. 273-279. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.1.35>
15. Разанов С.Ф., Куценко М.І. Фіторе mediaція дерново-підзолистого ґрунту за вирощування нектаропилконосних рослин в умовах Полісся. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 11. С. 213-222. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.23>
16. Разанов С.Ф., Куценко М.І. Оцінка рівня накопичення радіонуклідів сільськогосподарськими бобовими нектаропилконосними рослинами в умовах північного Полісся. *Сільське господарство та лісівництво*. 2024. № 3 (34). С. 198-207. DOI: 10.37128/2707-5826-2024-3-17

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 30.10.2025

Дата публікації: 05.12.2025