

**ДИНАМІКА ПИТОМОЇ АКТИВНОСТІ РАДІОАКТИВНИХ ІЗОТОПІВ
(^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) У СІРОМУ ЛІСОВОМУ ҐРУНТІ ПРАВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ
ЗАЛЕЖНО ВІД ЗАСТОСУВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ
ПРИ КУЛЬТИВУВАННІ ОЗИМОГО РІПАКУ**

ВРАДІЙ О. І. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент

orcid.org/0000-0001-7383-3829

Вінницький національний аграрний університет

АЛЕКСЕЄВ О. О. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент

orcid.org/0000-0001-5807-4932

Вінницький національний аграрний університет

КРІЛЕВИЧ В. Р. – аспірант

orcid.org/0009-0006-0063-6350

Львівський національний університет

ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Ґжицького

НЕДАШКІВСЬКА В. М. – здобувачка вищої освіти

orcid.org/0009-0006-9217-5554

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Постановка проблеми. Ринок мінеральних добрив в Україні зазнав кардинальних змін у зв'язку з повномасштабною війною. Після 2022 року кардинальний розворот на 180° і основний імпорт здійснюється з Євросоюзу та світових виробників із Близького та Далекого Сходу. Значне скорочення внутрішнього виробництва через руйнування, перебої з енергопостачанням та логістичні труднощі. Вітчизняні заводи часто працюють на знижених потужностях. Відбувається зміна логістичних ланцюгів на західні кордони та ускладнена морська логістика. Спостерігається відновлення імпорту (зростання на 20–30 % у 2023–2024 рр.) та зростання попиту з боку аграріїв, які намагаються компенсувати попередні втрати. Відбувається значне зростання цін через складну логістику, високі світові ціни на сировину та низьке завантаження вітчизняних заводів [2].

Ринок переорієнтувався на імпорт із нових регіонів (ЄС, Близький Схід), при цьому зріс його обсяг (порівняно з мінімальними показниками 2022 року), але подорожчала його вартість і ускладнилася логістика.

З точки зору екологічної безпеки та радіоекології, мінеральні добрива відіграють подвійну роль у поведінці радіонуклідів у системі «ґрунт-рослина». Деякі мінеральні добрива, особливо фосфорні та калійні, можуть містити природні радіонукліди. Фосфорні добрива (наприклад, суперфосфат, нітрофоска), виготовлені з фосфоритів або апатитів, можуть містити підвищену кількість радіонуклідів ряду урану та радію (^{238}U та ^{226}Ra), оскільки ці елементи часто співіснують у природних покладах фосфорної сировини [3].

Калійні добрива (наприклад, хлористий калій) є джерелом природного радіонукліда калію-40 (^{40}K). Хоча ^{40}K є природним, його масове щорічне внесення у ґрунт з добривами впливає на загальний баланс цього ізотопу, хоч і незначно порівняно з природним вмістом ^{40}K у ґрунті. Регулярне та багаторічне внесення таких добрив може призводити до поступового накопичення U і Ra у верхньому шарі ґрунту, створюючи додатковий радіаційний фон [1].

Найважливіша роль добрив полягає у впливі на доступність і міграцію радіонуклідів, які вже є в ґрунті (як природних, так і техногенних, наприклад, ^{137}Cs після ЧАЕС) [5].

Калійні добрива у вигляді потрапляння K знижує накопичення ^{137}Cs в рослинах. Велика кількість K в ґрунті конкурує з ^{137}Cs за поглинання коренями, «витісняючи» його та зменшуючи його перехід у рослину.

Фосфорні добрива забезпечують потрапляння фосфору, що може зв'язувати деякі радіонукліди у важкорозчинні сполуки в ґрунті та здебільшого знижує доступність радіонуклідів для рослин, сприяючи їх фіксації в ґрунті. Азотні добрива стимулюють інтенсивний ріст біомаси. Можуть сприяти ефекту «розведення»: хоча рослина поглинає радіонукліди, їхня питома активність на одиницю маси (наприклад, у врожаї) знижується через великий обсяг урожаю [6].

Правильно підібрані дози і типи добрив (особливо калійні у забруднених ^{137}Cs ґрунтах) є агрохімічним контрзаходом, що дозволяє знизити перехід радіонуклідів у сільськогосподарську продукцію, забезпечуючи тим самим екологічну безпеку.

Здатність різних видів рослин, включаючи сільськогосподарські культури, накопичувати радіоактивні речовини у надземній частині (явище фітоекстракції) є ключовим механізмом природного зниження рівня забруднення ґрунту [7]. Ефективність цього процесу, відомого як фіторе mediaція, безпосередньо залежить від інтенсивності міграції радіонуклідів по трофічному шляху в тканинах рослин.

Рослини можуть успішно розвиватися навіть в умовах високого радіаційного забруднення, не втрачаючи при цьому своєї продуктивності. Реакція рослинного організму на накопичення радіоактивних речовин є складною і включає синтез таких захисних і транспортних сполук, як фітохелати, органічні кислоти та метало-тіонеїни [4].

Встановлено, що деякі рослини є особливо ефективними акумуляторами радіонуклідів. Наприклад,

соняшник звичайний ефективно видаляє з ґрунту ^{137}Cs , U та ^{90}Sr , а щирія загнута інтенсивно накопичує ^{90}Sr та ^{137}Cs у пагонах. Водночас, культури, такі як кукурудза звичайна, виринниця та рогіз, ефективно видаляють U із середовища, а золотоболотник інтенсивно поглинає цезій, стронцій та торій [6].

З огляду на це, актуальність дослідження озимого ріпаку в контексті Правобережного Лісостепу полягає у необхідності оцінки його потенціалу як фітоекстрактора ключових радіонуклідів ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . Ріпак є стратегічно важливою олійною культурою, а отже, розуміння його здатності до фітоаккумуляції критично важливе як для радіоекологічної безпеки сільськогосподарської продукції, так і для використання його стерні як засобу дезактивації ґрунтів [2].

Важливим чинником, що впливає на фітореMediaцію, є доступність радіоактивних речовин для міграції ґрунтового-рослинним шляхом. Для цілеспрямованого посилення переміщення радіонуклідів у надземну біомасу (підвищення фітоекстракції) застосовують хімічні агенти. Зокрема, використання органічних кислот, таких як щавлева та лимонна кислоти, доведено підвищує фітоекстракцію урану деякими рослинами (наприклад, гірчицею салатною) [5].

У цьому світлі, дослідження впливу мінеральних добрив на динаміку ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra та ^{232}Th у сірому лісовому ґрунті під озимим ріпаком набуває особливої значущості. Це дозволить визначити, чи можуть агротехнічні заходи (внесення добрив) оптимізувати або, навпаки, стримувати перехід радіонуклідів у врожай ріпаку, що є ключовим для забезпечення безпеки продовольчої сировини та потенційного використання культури у програмах фітореMediaції [1].

Наші дослідження є критично важливим, оскільки вони дозволяють точно визначити, як зміна агрохімічних умов (застосування добрив) впливає на доступність і поглинання не лише техногенного ^{137}Cs , але й природних радіонуклідів ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th у сірому лісовому ґрунті, що є основою для безпечного вирощування продовольчої сировини [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження та публікації, що стосуються впливу мінеральних добрив на динаміку радіонуклідів у сірих лісових ґрунтах під озимим ріпаком, зосереджуються на таких ключових аспектах: 1. Конкурентна роль калію (K) проти цезію (^{137}Cs). Це найактивніша дослідницька сфера в радіоекології сільського господарства. Дослідження підтверджують, що калійне добриво (40 K є природним компонентом) є найефективнішим агрохімічним контрзаходом проти поглинання техногенного радіонукліда цезію-137 (^{137}Cs) рослинами. Оскільки K та Cs є хімічними аналогами, велика кількість доступного калію в ґрунті (завдяки добривам) блокує поглинання цезію кореневою системою ріпаку [4].

Сірі лісові ґрунти Правобережного Лісостепу (часто мають середній або підвищений вміст обмінного калію, але кислі або слабокислі) демонструють високу ефективність внесення калійних добрив, оскільки це швидко знижує рухливість ^{137}Cs і зменшує коефіцієнт переходу (КП) радіонукліда до насіння та зеленої маси ріпаку [6].

2. Поведінка радіонуклідів (Ra , Th) та вплив рН. Динаміка ^{226}Ra та ^{232}Th – менше залежить від конкуренції з основними елементами добрив, але тісно пов'язана з кислотністю ґрунту та фосфорним живленням. Вплив рН та азотних добрив: азотні добрива (наприклад, сульфат амонію, аміачна селітра) можуть викликати підкислення ґрунту. У кислих умовах рухливість ^{226}Ra може зростати, що потенційно збільшує його надходження в рослину. Роль фосфору: як зазначалося, фосфорні добрива можуть самі бути джерелом ^{226}Ra (через фосфоритну сировину). Однак у ґрунті фосфати мають тенденцію зв'язувати ^{226}Ra і ^{232}Th у важкорозчинні сполуки, зменшуючи їхню доступність для поглинання ріпаком [7].

Динаміка в ґрунті: основна частина ^{226}Ra та ^{232}Th у сірих лісових ґрунтах зазвичай сильно фіксована в ґрунтового комплексі, і їхні коефіцієнти переходу в ріпак, як правило, дуже низькі порівняно з ^{137}Cs та ^{40}K . Вплив добрив на ці ізотопи є менш вираженим [2].

Останні дослідження підкреслюють особливості ріпаку як об'єкта дослідження. Коефіцієнти переходу (КП) радіонуклідів у насіння ріпаку (кінцевий продовольчий продукт) зазвичай значно нижчі, ніж у вегетативній масі (стебло, листя). Це пов'язано з селективним бар'єром при транспортуванні елементів у репродуктивні органи. Ефект «розведення»: ефективна система мінерального живлення (особливо азотне підживлення) різко підвищує врожайність ріпаку. Це призводить до того, що загальна кількість радіонукліда розподіляється на більшу біомасу, що знижує питому активність (Бк/кг) у продукції. Таким чином, добрива опосередковано підвищують екологічну безпеку врожаю, підвищуючи його якість [3].

Існують регіональні дослідження (хоча прямі публікації на задану тему є рідкісними та вузькоспеціалізованими), які підтверджують, що в умовах Лісостепу (де сірі лісові ґрунти є поширеними) оптимальна агротехніка, що включає коригування калію, є ключовим фактором контролю вмісту ^{137}Cs у сільськогосподарських культурах [6].

Основний екологічний ризик і, відповідно, основна увага досліджень зосереджена на контролі міграції ^{137}Cs через застосування калійних добрив. Динаміка природних радіонуклідів (Ra , Th) визначається переважно фоновими властивостями ґрунту, але може бути опосередковано змінена через реакцію ґрунту на азотні та фосфорні добрива [4].

Мета статті – визначити закономірності впливу різних систем мінерального удобрення на питому активність радіонуклідів (^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) у сірому лісовому ґрунті Правобережного Лісостепу, а також встановити їхню динаміку переходу в урожай озимого ріпаку для обґрунтування екологічно безпечних агротехнічних заходів.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження проводили на дослідних ділянках в умовах Правобережного Лісостепу України. Сірий лісовий ґрунт характеризується слабокислою реакцією ґрунтового розчину (рН) та середнім рівнем забезпеченості поживними речовинами. Ці ґрунти є типовими для регіону, але мають підвищену чутливість до радіонуклідного

забруднення. Культура посіву – озимий ріпак (сорт Атлант). У таблиці 1 подана схема проведення дослідження, де для вивчення впливу агрохімічних заходів на радіонуклідну динаміку було застосовано дві контрастні системи мінерального живлення, націлені на різні рівні врожайності.

Визначення питомої активності радіонуклідів здійснювалося в ґрунті, а також у вихідних мінеральних добривах. Визначення вмісту радіонуклідів проводили у Радіоекологічній лабораторії Інституту сільського господарства Полісся НААН України за допомогою гамма-спектрометричного методу (визначення питомої активності, Бк/кг) приладом спектрометром СЕГ-05.

Результати досліджень. Визначення вмісту радіонуклідів у вихідних мінеральних добривах (табл. 2) показало, що добрива є джерелом надходження як природних (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th), так і техногенного (^{137}Cs) ізотопів у ґрунт.

Для наочної демонстрації різниці у вмісті радіонуклідів між добривами, їхню активність можна представити на логарифмічній шкалі (через величезну різницю у вмісті ^{40}K . Калій хлористий виділяється як джерело найвищої питомої активності серед усіх добрив, оскільки калійні добрива є основним джерелом природного ^{40}K .

^{40}K 16 400 Бк/кг є головним домінуючим радіонуклідом. Калійні добрива (калій хлористий) є головним джерелом внесення в ґрунт усіх чотирьох радіонуклідів, включаючи техногенний ^{137}Cs . Фосфорні добрива (суперфосфат подвійний) займають проміжне місце за активністю більшості ізотопів, але їхній вміст ^{226}Ra та ^{232}Th значно вищий, ніж в азотних добривах, що підтверджує зв'язок між фосфатною сировиною та природними радіоактивними рядами.

За результатами досліджень (табл. 4–5) встановлено, що удобрення мінеральними добривами сірого лісового ґрунту при вирощуванні озимого ріпаку з запланованою урожайністю 30 ц/га і 35 ц/га потрапляє 3 740 808 Бк/га і 5 205 526,3 Бк/га радіоактивних речовин відповідно.

При цьому у ґрунт надходить відповідно 0,3 % і 0,4 % радіоактивних речовин з аміачною селітрою, 33,7 % і 36,3 % з суперфосфатом подвійним та 63,2 % і 65,9 %, з калієм хлористим. Найвища кількість ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th у ґрунті потрапляє з калієм хлористим порівняно з аміачною селітрою та суперфосфатом простим у 181,5 рази та 1,85 рази відповідно.

При вирощуванні озимого ріпаку із запланованою врожайністю 30 ц/га до сірого лісового ґрунту

Таблиця 1

Схема дослідження (системи удобрення)

Рівень врожайності (плановий)	Формула добрив (азот/фосфор/калій)	Призначення
Мінімальний (3,0 т/га)	$\text{N}_{100}\text{P}_{80}\text{K}_{90}$	Базовий (підтримуючий) рівень живлення
Максимальний (3,5 т/га)	$\text{N}_{200}\text{P}_{120}\text{K}_{120}$	Інтенсивний рівень живлення (високі дози азоту та калію)

Таблиця 2

Питома активність радіонуклідів у добривах (Бк/кг)

Мінеральне добриво	Хімічна група	^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
Аміачна селітра	Азотне (N)	2,5	26,8	5,8	4,6
Суперфосфат подвійний	Фосфорне (P)	12,7	7850	11,8	6,0
Калій хлористий	Калійне (K)	26,8	16 400	19,4	9,9
Діапазон, Бк/кг		2,5–26,8	26,8–16 400	5,8–19,4	4,6–9,9

Таблиця 3

Переважаючий вміст ^{40}K порівняно з іншими радіонуклідами в кожному типі добрив

Радіонуклід	Активність у калії хлористому (Бк/кг)	Порівняння (найвищий показник)	Радіонуклід
^{40}K	16 400	612 разів вище, ніж в аміачній селітрі	^{40}K
^{137}Cs	26,8	10,7 разів вище, ніж в аміачній селітрі	^{137}Cs
^{226}Ra	19,4	3,34 рази вище, ніж в аміачній селітрі	^{226}Ra
^{232}Th	9,9	2,1 рази вище, ніж в аміачній селітрі	^{232}Th

Таблиця 4

Вплив мінеральних добрив на питому активність радіонуклідів у сірому лісовому ґрунті за вирощування озимого ріпаку при запланованій урожайності 30 ц/га, Бк/га

Мінеральні добрива	Діюча речовина, кг	Фактична маса, кг	Радіонукліди			
			^{137}Cs	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
Аміачна селітра	100	290	725	7772	1682	1334
Суперфосфат подвійний	80	160	2032	1 256 000	1888	960
Калій хлористий	90	150	4020	2 460 000	2910	1485

Таблиця 5

Вплив мінеральних добрив на питому активність радіонуклідів у сірому лісовому ґрунті за вирощування озимого ріпаку при запланованій урожайності 35 ц/га, Бк/га

Мінеральні добрива	Діюча речовина, кг	Фактична маса, кг	Радіонукліди			
			¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th
Аміачна селітра	200	579	1447,5	15 517,2	3358,2	2663,4
Суперфосфат подвійний	120	240	3048	1 884 000	2832	1440
Калій хлористий	120	200	5360	3 280 000	3880	1980

з аміачною селітрою (N_{100}), суперфосфатом подвійним (P_{80}) та калієм хлористим (K_{90}) надходить 6777 Бк/га ^{137}Cs , 3 723 772 Бк/га – ^{40}K , 6480 Бк/га – ^{226}Ra та 3779 Бк/га – ^{232}Th відповідно.

Із загальної кількості радіонуклідів з аміачною селітрою, суперфосфатом подвійним та калієм хлористим при запланованій урожайності 30 ц/га насіння озимого ріпаку у ґрунт потрапляє 10,6 %, 29,8 % та 59,3 % – ^{137}Cs , 0,2 %, 33,7 % та 66,0 % – ^{40}K , 35,3 %, 25,4 % та 39,2 % – ^{226}Ra і 35,3 %, 25,4 % та 39,2 % – ^{232}Th відповідно.

За вирощування озимого ріпаку із запланованою урожайністю насіння 35 ц/га до ґрунту надходить з аміачною селітрою (N_{200}), суперфосфатом подвійним (P_{120}) та калієм хлористим (K_{120}) 9855,5 Бк/га – ^{137}Cs , 5 179 517 Бк/га – ^{40}K , 10 070,2 Бк/га – ^{226}Ra і 6083,4 Бк/га – ^{232}Th . Із загальної кількості радіоізотопів з аміачною селітрою, суперфосфатом подвійним та калієм хлористим при запланованій урожайності 35 ц/га у ґрунт потрапляє 14,6 %, 30,9 % та 54,3 % – ^{137}Cs , 0,29 % 36,3 % та 63,3 % – ^{40}K , 33,3 %, 28,1 % та 38,5 % – ^{226}Ra і 43,7 %, 23,6 % та 32,5 % – ^{232}Th відповідно.

Висновки. Проведені дослідження підтвердили, що мінеральні добрива, які використовуються в сільському господарстві, є джерелом надходження радіонуклідів (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs) у ґрунт.

Домінуюче джерело радіонуклідів: калійні добрива (калій хлористий) мають найвищу питому активність серед усіх досліджених добрив, виділяючись як головне джерело внесення в ґрунт усіх чотирьох радіонуклідів. Це зумовлено надзвичайно високим вмістом природного ізотопу ^{40}K , який є головним домінуючим радіонуклідом в усіх добривах (наприклад, 16 400 Бк/кг у калії хлористому).

Фосфорні добрива (суперфосфат подвійний) займають проміжне місце за активністю, але їхній вміст ^{226}Ra та ^{232}Th є значно вищим, ніж в азотних добривах, що корелює зі зв'язком між фосфатною сировиною та природними радіоактивними рядами.

При вирощуванні озимого ріпаку на сірому лісовому ґрунті із запланованою врожайністю 30 ц/га та 35 ц/га загальна кількість радіоактивних речовин, що потрапляє у ґрунт з мінеральними добривами, становить відповідно 3 740 808 Бк/га та 5 205 526,3 Бк/га. Калій хлористий забезпечує найбільший відсотковий внесок у загальну кількість радіоактивних речовин, що потрапляють у ґрунт (63,2 %–65,9 % від загальної активності). Суперфосфат подвійний вносить значну частку (33,7 %–36,3 %).

Аміачна селітра має мінімальний внесок (0,3 %–0,4 %).

У структурі радіонуклідного навантаження на ґрунт ^{40}K є абсолютним лідером за кількістю, що надходить.

Калій хлористий є найбільшим джерелом внесення у ґрунт усіх ізотопів, зокрема, він забезпечує найбільшу кількість ^{137}Cs (54,3 %–59,3 %) та ^{40}K (63,3 %–66,0 %) від загальної кількості цих ізотопів.

Мінеральні добрива є вагомим чинником додаткового радіоактивного забруднення ґрунту, причому калійні та фосфорні добрива несуть найбільший радіонуклідний ризик. Це вимагає обов'язкового врахування вмісту радіонуклідів у добривах при розробці агротехнічних заходів для мінімізації надходження радіоактивних речовин у ґрунтово-рослинну систему.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Дідур І., Алексєєв О., Лотоцький Р., Бальковський О. Вплив способу обробітку ґрунту на інтенсивність накопичення цезію-137 у вегетативній масі грятости збірної (*Dactylis glomerata* L.). *Вісник Львівського національного університету природокористування «Агрономія»*. 2024. № 28. С. 36–41. DOI: <https://doi.org/10.31734/agronomy2024.28.036>
- Razanov S., Koruniak O., Dydiv A., Holubieva T., Symochko L., Balkovsky V., Alekseev O., Vradii O., Ohorodnichuk H., Polishchuk M., Kolisnyk 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>
- 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>
- 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>
- Куценко М. І. Інтенсивність накопичення радіонуклідів вегетативною масою фацелії пихомлистої. *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>
- 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>

7. 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

REFERENCES:

1. Didur I., Aliksieiev O., Lototskyi R. & Balkovsky O. (2024). Vplyv sposobu obrobittu ґрунту na intensyvnyist nakopychennia tseziu-137 u vehetatyvni masi hriastytsi zbirnoi (*Dactylis glomerata* L.) [The influence of soil cultivation method on the intensity of accumulation of cesium-137 (^{137}Cs) in the vegetative mass of garden grass (*Dactylis glomerata* L.)]. *Visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu pryrodokorystuvannia "Ahronomiia"*, 28, 36–41 DOI: <https://doi.org/10.31734/agronomy2024.28.036> [in Ukrainian].
2. 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. (2023). Radioprotective and sorption properties of beespine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*, 13 (2), 71–76. DOI: <https://doi.org/10.31407/ijeess13.2>
3. Didur I. M., Aliksieiev O. O., Pantsyrev H. V. & Pryimak Yu. S. (2024). Radioekologichna otsinka siroho lisovoho ґрунту pryrodnykh luk Lisostepu Pravoberezhnoho pislia 37-richnoho periodu vid avarii na Chornobylskii AES [Radioecological assessment of gray forest soil of natural meadows of the Right Bank Forest-Steppe after a 37-year period since the Chernobyl accident]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu (Ahronomiia i biolohiia)*, 58, 4, 30–36. DOI: <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.4.5> [in Ukrainian].
4. Didur I. M., Pantsyrev H. V., Aliksieiev O. O., Pryimak Yu. S. & Mishchenko B. D. (2024). Radiolohichna otsinka derno-opiczolenoho pishchanoho ґрунту prysadybnykh terytorii pislia 37-richnoho periodu avarii na Chornobylskii AES. [Radioecological assessment of gray forest soil of natural meadows of the Right Bank Forest-Steppe after a 37-year period since the Chernobyl accident.] *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Silskohospodarski nauky*. № 139. Ch. 1. S. 251–257 DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.1.33> [in Ukrainian].
5. Kutsenko M. I. (2024). Intensyvnyist nakopychennia radionuklidiv vehetatyvnoi masoiu fatselii pyzhmolystoi [Intensity of radionuclide accumulation by the vegetative mass of *Phacelia tansy*]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Silskohospodarski nauky*, 1, 139, 273–279 DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.139.1.35> [in Ukrainian].
6. Razanov S. F. & Kutsenko M. I. (2025). Fitoremediatsiia derno-opiczolenoho ґрунту za vyroshchuvannia nektaropylkonosnykh roslin v umovakh Polissia [Phytoremediation of sod-podzolic soil by growing nectar-pollen-bearing plants in the conditions of Polissia]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychkykh nauk*, 11, 213–222 DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.23> [in Ukrainian].
7. Razanov S. F. & Kutsenko M. I. (2024). Otsinka rivnia nakopychennia radionuklidiv silskohospodarskymy

bobovymy nektaropylkonosnymy roslynamy v umovakh pivnichnoho Polissia [Assessment of the level of radionuclide accumulation by agricultural legume nectar-pollinated plants in the conditions of northern Polissia]. *Sil'ske gospodarstvo ta lisivnytstvo*, 3 (34), 198–207 DOI: 10.37128/2707-5826-2024-3-17 [in Ukrainian].

Врадій О. І., Алексєєв О. О., Крілевич В. Р., Недашківська В. М. Динаміка питомої активності радіоактивних ізотопів (^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) у сірому лісовому ґрунті Правобережного Лісостепу залежно від застосування мінеральних добрив при культивуванні озимого ріпаку

Мета статті – визначити вміст радіонуклідів ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs у основних видах мінеральних добрив (азотних, фосфорних, калійних) та оцінити загальний радіонуклідний внесок цих добрив у сірий лісовий ґрунт при вирощуванні озимого ріпаку з різною запланованою врожайністю (30 ц/га і 35 ц/га). **Методи.** Проведено гамма-спектрометричне визначення питомої активності радіонуклідів (^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) у зразках аміачної селітри, суперфосфату подвійного та калію хлористого. На основі отриманих даних та фактичних норм внесення добрив, необхідних для досягнення запланованої врожайності озимого ріпаку, розраховано загальне надходження радіоактивних речовин у Бк/га у сірий лісовий ґрунт. **Результати.** Встановлено, що мінеральні добрива є джерелом надходження у ґрунт радіонуклідів радіонуклідів. Калій хлористий демонструє найвищу питому активність серед усіх добрив за рахунок високого вмісту природного ізотопу ^{40}K (до 16 400 Бк/кг), який є головним домінуючим радіонуклідом. Фосфорні добрива (суперфосфат подвійний) мають підвищений вміст ^{226}Ra та ^{232}Th . При внесенні добрив для вирощування озимого ріпаку (врожайність 30–35 ц/га) загальне радіоактивне навантаження на сірий лісовий ґрунт складає 3,7–5,2 МБк/га. Найбільший внесок у загальне забруднення забезпечує калій хлористий 63–66 %, а ^{40}K становить переважну частку внесеної радіоактивності. **Висновки.** Мінеральні добрива є вагомим чинником додаткового радіоактивного навантаження на ґрунт. Калійні та фосфорні добрива несуть найбільший радіонуклідний ризик. Калій хлористий є найбільшим джерелом внесення у ґрунт ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th . Необхідно обов'язково враховувати вміст радіонуклідів у добривах при плануванні агротехнічних заходів для мінімізації їх надходження у ґрунтово-рослинну систему.

Ключові слова: мінеральні добрива, радіонукліди, ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , питома активність, радіоактивне навантаження.

Vradii O. I., Aliksieiev O. O., Krilevych V. R., Nedashkivska V. M. Dynamic of specific activity of radioactive isotopes (^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) in grey forest soil of the Right-Bank Forest-Steppe depending on mineral fertilizer application in *Brassica napus* L. oleifera cultivation

The aim of the article is to determine the content of radionuclides ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in the main types of mineral fertilizers (nitrogen, phosphorus, potassium) and to assess the total radionuclide input of these fertilizers into grey forest soil during *Brassica napus* L. *oleifera* cultivation with varying target yields (30 c/ha and 35 c/ha).

Methods. Gamma-spectrometric determination of the specific activity of radionuclides ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th

was carried out in samples of ammonium nitrate, double superphosphate, and potassium chloride. Based on the obtained data and the actual fertilizer application rates required to achieve the planned *Brassica napus L. oleifera* yield, the total input of radioactive substances in Bq/ha into the grey forest soil was calculated. **Results.** It was established that mineral fertilizers are a source of radionuclide input into the soil. Potassium chloride shows the highest specific activity among all fertilizers due to the high content of the natural isotope ^{40}K (up to 16 400 Bq/kg), which is the main dominant radionuclide. Phosphorus fertilizers (double superphosphate) have an increased content of ^{226}Ra and ^{232}Th . When applying fertilizers for *Brassica napus L. oleifera* cultivation (yield 30–35 c/ha),

the total radioactive load on the grey forest soil is 3.7–5.2 MBq/ha. The largest contribution to the total contamination is provided by potassium chloride (63–66 %), and ^{40}K constitutes the predominant share of the introduced radioactivity. **Conclusions.** Mineral fertilizers are a significant factor of additional radioactive load on the soil. Potassium and phosphorus fertilizers carry the greatest radionuclide risk. Potassium chloride is the largest source of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th input into the soil. It is necessary to mandatory consider the radionuclide content in fertilizers when planning agricultural measures to minimize their input into the soil-plant system.

Key words: mineral fertilizers, radionuclides, ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , specific activity, radioactive load.

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 14.12.2025