

РАДІОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА СІРОГО ЛІСОВОГО ҐРУНТУ ПРИРОДНИХ ЛУК ЛІСОСТЕПУ ПРАВОБЕРЕЖНОГО ПІСЛЯ 37-РІЧНОГО ПЕРІОДУ ВІД АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС

Дідур Ігор Миколайович

доктор сільськогосподарських наук, професор
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна
ORCID: 0000-0002-6612-6592
Didurihor@gmail.com

Алексєєв Олексій Олександрович

кандидат сільськогосподарських наук, доцент
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна
ORCID: 0000-0001-5807-4932
alekseev_oleksiy@ukr.net

Панцирева Ганна Віталіївна

кандидат сільськогосподарських наук, доцент
Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна
ORCID: 0000-0002-0539-5211
apantsyрева@ukr.net

Приймак Юрій Сергійович

аспірант
Львівський національний університет природокористування, м. Львів, Україна
ORCID: 0009-0000-1060-6354
yura2402@gmail.com

Техногенне навантаження на природні кормові угіддя щороку зростає внаслідок антропогенної діяльності населення. Серед токсикантів радіонукліди займають одне із перших місць по небезпечності для живих організмів. Перебуваючи в обмінній формі та мігруючи в природних екосистемах, радіонукліди потрапляють в живі організми, викликаючи різні порушення на клітинному, органному та організмовому рівні в цілому. Порушення, які виникають при опроміненні викликають цілий ряд захворювань, внаслідок яких відбувається пониження імунної ланки організму. Основний шлях надходження радіонуклідів до живих організмів є харчовий ланцюг. Забруднення ґрунтів радіоактивними речовинами призводить до накопичення їх в продукції рослинництва. Використання такої продукції в харчуванні людини сприяє підвищенню радіаційного навантаження на її організм включаючи різні захворювання. З метою зниження радіаційного навантаження на населення використовують ряд заходів, які перешкоджають переміщення радіонуклідів в системі ґрунт → рослинна продукція → організм людини. До основних із них необхідно віднести агротехнічні заходи, зокрема, обробіток ґрунту, застосування сорбентів, мінеральні добрива, спеціалізація галузі рослинництва, яка передбачає виробництво на забруднених ґрунтах продукції яка не використовується в харчовій сфері людини, але є необхідна для промисловості, зокрема енергетичні культури. Однак, в умовах природних лук дані заходи є малоефективними, тому використання їх рослинності повинно бути під постійним контролем. Проблеми використання агротехнічних заходів щодо зниження міграції радіонуклідів у системі ґрунт → рослинність в умовах природних лук полягають у високих матеріальних витратах на відновлення цих угідь. Природні луки перед застосуванням агротехнічних заходів щодо зниження міграції радіонуклідів у рослинність потребують додаткових витрат для проведення підготовки площ під відновлення, до того ж нерівномірний рельєф не дає можливості ефективного застосування агротехніки. Моніторинг на забруднення природних кормових лук цезієм-137 в умовах Вінниччини показав, що вміст цього токсиканту в сірих лісових ґрунтах не перевищує рівень до аварійного періоду на Чорнобильській атомній електростанції та складає від 0,105 Кі/км² до 0,247 Кі/км². За результатами досліджень встановлено, що в умовах Лісостепу правобережного вміст цезію-137 у сірому лісовому ґрунті природних кормових лук знаходився у такій зростаючій послідовності: нормальні суходоли → абсолютні суходоли → суходоли надмірного зволоження. Найнижчий вміст цезію-137 у сірому лісовому ґрунті спостерігався в умовах нормальних суходолів, тоді як найвищий – у перезволожених суходолів. Найвищу різницю за період 2019–2024 рр. по вмісту цезію-137 у сірих лісових ґрунтах виявлено в умовах нормальних суходолів, які характеризуються високою злаково-бобовою рослинністю та активним використанням під випас великої рогатої худоби. Тоді як найнижча різниця була виявлена в умовах перезволожених лук, кормова сировина яких малопридатна для годівлі тварин. Тобто продуктивність природних лук та інтенсивність використання тваринами їх рослинності має суттєвий вплив на радіологічний стан природних лук. Радіонукліди, перебуваючи в обмінній формі по трофічному ланцюгу, накопичуються в рослинності, а по мірі її споживання тваринами і в їх організмі. На територіях з малопридатною

для споживання тваринами рослинністю винесення цезію-137 внаслідок фітотроремедіації малоефективне, що притаманне перезволоженим лукам, на яких зростають переважно осокові.

Ключові слова: природні луки, ґрунти, забруднення, радіонукліди, цезій-137, фітотроремедіація.

DOI <https://doi.org/10.32782/agrobio.2024.4.5>

Вступ. Техногенне навантаження на навколишнє середовище призвело до помітного підвищення вмісту токсикантів у ґрунтах природних лук, зокрема, і радіонуклідів. Лише аварія на Чорнобильській АЕС призвела до викиду в навколишнє середовище до 50 Кі різного виду радіонуклідів, серед яких високу небезпеку через включення у колообіг та трансформування в рослинницьку продукцію представляє цезій-137. Виявлено, що майже у всіх територіях України після аварії на Чорнобильській АЕС спостерігалось підвищення у ґрунтах цезію-137. Рівень забруднення ґрунтів цезієм-137 виявився різним, він коливався від 1 Кі/км² до 15 Кі/км² і вище (Baranovskiy & Baranovska, 2016; Bulyhin et al., 2012; Hrynyk, 2015; Landin, 2016; Landin et al., 2018).

Поглинання і сорбція радіонуклідів ґрунтом дуже залежить від вмісту в ньому відповідних стабільних нуклідів – чим вище вміст стабільних, тим менше радіоактивних закріплюється в ґрунті і більше надходить у рослини. Цей ефект пояснюється простим розбавленням радіонуклідів в ґрунті за рахунок стабільних і зменшенням частки радіоактивних в загальному закріпленні елемента.

Рух повітря, атмосферні опади, температура довкілля та деякі інші явища, що характеризують особливості погодно-кліматичних умов, відіграють важливу роль в міграції радіонуклідів не тільки в атмосфері, але і в ґрунті.

Величезне значення щодо їх розповсюдження має рух повітря, тобто вітер. За рахунок вітрового підняття з поверхні ґрунту і переносу стає можливим вторинне надзвичайно швидке переміщення радіоактивних речовин на відстані десятків кілометрів від місця її випадання, що може обумовити забруднення або підвищення рівня забруднення більш чистих ґрунтів.

Найбільш важливим фактором, що впливає на вітровий підйом радіоактивних частинок, є швидкість руху повітря. Підйом ґрунтових частинок відбувається швидше із сухої поверхні, розораних полів, схилів, які продуваються вітрами.

Фітотроремедіація – це процес використання рослин для очищення забрудненого ґрунту, ґрунтових вод, поверхневих вод і повітря. Зелені насадження використовуються для зниження загроз, які несуть забруднення, для нейтралізації забруднюючих речовин і очищення забруднених територій. За допомогою рослин можна позбутися багатьох забруднювачів, включаючи також радіонукліди. Це чистий і економічний спосіб видалення токсичних речовин, які в іншому випадку можуть проникнути в ґрунт і з дощовою водою потрапити в довколишні джерела питної води (Moosavi & Mohamd, 2013; Singh et al., 2022; Jeong & Choi, 2017; Hudkov et al., 2018; Datsko & Yatsenko, 2024).

Відмічено, що при вирощуванні рослин в умовах перезволожених ґрунтів надходження до них радіонуклі-

дів виявляється значно вищим, порівняно з ґрунтами з низьким рівнем води. Це є наслідком здатності твердої фази ґрунту до поглинання і утримування радіонуклідів. Але цілком очевидно, що ця здатність у різних типів ґрунтів повинна бути виражена неоднаково. У значній мірі вона залежить від механічного та мінералогічного складу ґрунту, який є одним з важливих факторів, що визначають характер міграції радіонуклідів в ґрунті та їх перехід у рослини. Сорбційна здатність ґрунтів зростає зі збільшенням дисперсності його механічних елементів.

Найбільш міцно утримуються радіоактивні продукти поділу муловою фракцією ґрунту. Крім того, дрібнодисперсні глинисті і мулові фракції ґрунту містять більшу кількість мінералів монтморилонітової групи, слюд і гідрослюд, які належать до трьохшарових мінералів, що мають високу вбирну здатність. Переважаючими ж мінералами фракцій піску, навіть дрібного, є кварц і польові шпати, сорбційні властивості яких дуже низькі (Hudkov, 2016; Dutov & Abidov, 2015).

Враховуючи високу небезпеку цезію-137 було розроблено цілий ряд організаційних, агрохімічних, технологічних та економічних заходів щодо зниження переміщення цезію-137 як у самих ґрунтах, так і рослинності (Khomutinin et al., 2022; Chobotko et al., 2020).

Зокрема, встановлено високу ефективність сорбентів (цеоліт, сапоніт, бентонітова глина та ін.) щодо зниження міграції цезію-137 в системі ґрунт–рослинність (Romanchuk, 2015; Romanchuk et al., 2019; Furdychko, 2019).

Значний вплив на переміщення цезію-137 в системі ґрунт–рослинність спостерігався за використанням мінеральних добрив (азотні, фосфорні, калійні). Так, винесення азотних добрив, як правило, підвищує перехід цезію-137 з ґрунту в рослинність, а калію – знижує (Melnyk, 2020; Omelianets et al., 2014; Razanov et al., 2021).

Суходільні низинні луки України представлені абсолютними суходолів є горби, вершини та схили, у нормальних суходолів дещо підвищена місцевість більш рівномірним плато. Суходоли надмірного зволоження характеризуються незначними пониженнями водороздільних масивів, з тимчасовим зволоженням навесні і восени, місцями заболочені. В Україні нараховується до 6,7 млн га природних кормових лук, з них пасовищ 68,6%, сіножатей – 31,4% (Makarenko, 2019; Olifirovych, 2018; Petrychenko, 2010).

Луки мають різну інтенсивність їх експлуатації, що визначається як ботанічним походженням рослинності, так і її урожайністю. За таких умов спостерігаються різні зміни у ґрунтах внаслідок винесення з них хімічних речовин, в тім числі і токсикантів з урожаєм (Singh et al., 2022; Havrysh, 2016; Hryhora & Yakubenko, 2021; Lopushniak et

al., 2016). Поряд з цим виявлено високу ефективність у зниженні радіаційного навантаження на ґрунти шляхом винесення цезію-137 з урожаєм сільськогосподарських культур. Однак, більшість із цих заходів має низьку ефективність застосування в умовах природних лук.

За таких умов виникає потреба у вивченні поведінки цезію-137 у ґрунтах луків для прогнозованого контролю за їх надходженням у кормову сировину.

Методи досліджень. Дослідження з вивчення особливостей забруднення сірих лісових ґрунтів природних лук цезієм-137 проводили в умовах Лісостепу Правобережного на території Вінниччини, Вінницького району.

Схема досліджень охоплювала три варіанти I – ґрунти абсолютних суходолів, II – ґрунти нормальних суходолів та III – ґрунти суходолів надмірного зволоження. Кожний варіант включав чотири повторності. Розмір ділянок луків складав 25 м². Відбір ґрунтів проводили на глибині 10 см – методом конверту.

Визначення цезію-137 проводили гамма-спектрометричним методом на приладі СЕГ-05.

Біометричну обробку отриманих результатів досліджень проводили з урахуванням середнього арифметичного значення (M), середнього квадратичного відхилення (m) та достовірності різниці середніх значень (критерії P). Для позначення ймовірності в таблицях використовуються умовні позначення: P < 0,05*; P < 0,01**; P < 0,001***.

Метою досліджень було вивчення інтенсивності забруднення природних лук Вінниччини цезієм-137 після 37-річного періоду аварії на Чорнобильській АЕС.

Результати. Аналіз рослинності природних лук Вінниччини показав деякі особливості у її складі та інтенсивності їх використання. Зокрема, в умовах абсолютних та нормальних суходолів серед різнотрав'я велике значення для випасання худоби мають злаково-бобові трави: костриця, грястиця, тимофіївка лучна, райграс пасовищний, конюшина біла, горошок лучний та конюшина рожева.

Однак, в умовах абсолютних суходолів злаково-бобова суміш є нечисленною та низькопродуктивною через низького рівня зволоження та високих температур, тому такі території в певній мірі використовують тварини. Нормальні суходоли більш продуктивні, тому активно використовуються під випасання тварин, хоча в останні роки за низького рівня опадів та високих температур продуктивність нормальних суходолів знизилась.

Перезволожені суходоли представлені заболоченими територіями, на яких зростають переважно осокові. Дані луки практично не використовуються під випас тварин. Тобто за даних особливостей зростання рослинності природних лук та її використання, що характеризується різною інтенсивністю винесення з ґрунтів хімічних речовин, можна очікувати різні зміни у ґрунтах і токсикантів, зокрема, цезію-137.

За результатом досліджень виявлено певну різницю по вмісту цезію-137 у сірому лісовому ґрунті абсолютних, нормальних та суходолів надмірного зволоження (табл. 1).

Так, у сірому лісовому ґрунті нормальних суходолів спостерігався найнижчий вміст цезію-137 який склав 0,105 Бк/кг порівняно вищий у ґрунтах абсолютних суходолів та перезволожених суходолів. Зокрема вміст цезію-137 у сірому лісовому ґрунті нормальних суходолів був нижчий порівняно з ґрунтами абсолютних суходолів на 11,0% та з ґрунтами перезволожених суходолів на 58,1%.

Подібна тенденція була виявлена і станом на 2024 рік. Так, вміст цезію-137 був нижчим у ґрунтах нормальних суходолів порівняно з ґрунтами абсолютних та перезволожених суходолів відповідно на 15,5% і 60,3% відповідно.

Аналіз вмісту цезію 137 у сірому лісовому ґрунті (рис. 1) показав, що за 2019-2024 роки спостерігалось деяке зниження рівня забруднення природних кормових лук. Найвища різниця між періодом 2019 року та 2024 року виявлена у сірому лісовому ґрунті нормальних суходолів. Зокрема, вміст цезію 137 у сірому лісовому ґрунті нормальних суходолів у 2024 році був нижчим на 6,6% порівняно з 2019 роком. У ґрунтах абсолютних суходолів та суходолів помірного зволоження вміст цезію 137 у 2024 році знизився лише на 1,7%, та 1,6% відповідно порівняно з 2019 роком.

Обговорення. Після аварії на Чорнобильській АЕС на забруднених територіях відбулися значні зміни у радіоecологічній ситуації (Dutov, 2014; Deisan et al., 2011). Ці зміни стали можливими завдяки поєднанню природних реабілітаційних процесів і впровадження комплексу протирадіаційних заходів (Prister, 2007; Prister et al., 2007). До природних процесів належать фізичний розпад радіонуклідів, який поступово зменшує радіоактивність, та їх іммобілізація ґрунтово-поглинаючим комплексом, що сприяє закріпленню радіонуклідів у ґрунті й знижує ризик їх подальшого поширення. Водночас комплекс протирадіаційних заходів допоміг додатково

Таблиця 1

Вміст цезію-137 у ґрунтах природних лук, Бк/кг (n=4, M±m)

Варіанти досліджень	Роки досліджень	Результати повторностей у варіантах				В середньому по варіанту досліджу
		I	II	III	IV	
Ґрунти абсолютних суходолів	2019	0,125	0,129	0,111	0,107	0,118 ± 0,009
	2024	0,126	0,123	0,109	0,107	0,116 ± 0,008
Ґрунти нормальних суходолів	2019	0,104	0,107	0,100	0,109	0,105 ± 0,003
	2024	0,091	0,095	0,092	0,094	0,098 ± 0,002
Ґрунти перезволожених суходолів (болота)	2019	0,271	0,261	0,231	0,244	0,251 ± 0,015
	2024	0,268	0,264	0,220	0,390	0,247 ± 0,063

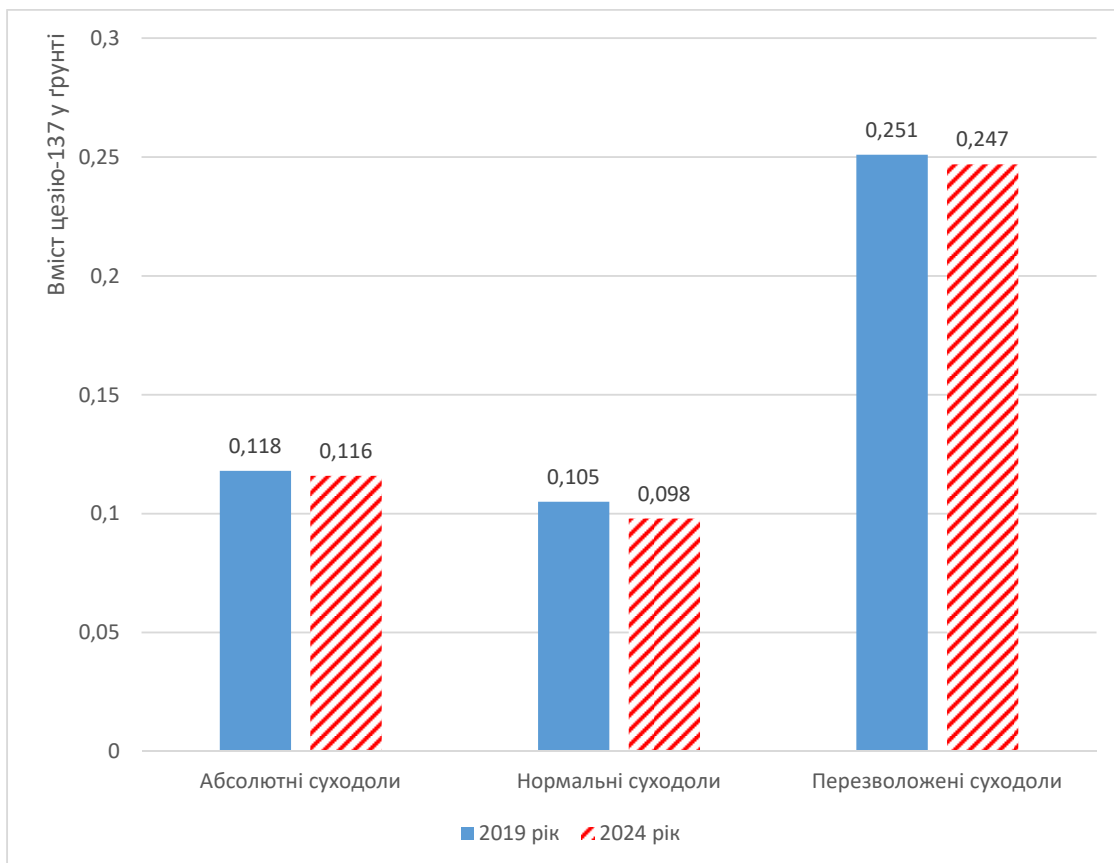


Рис. 1. Порівняльна оцінка забруднення природних кормових лук цезієм-137 протягом 2019–2024 рр., Кі/км²

мінімізувати радіаційний вплив. На думку Нгунук О.І. (2015), найбільшу радіологічну небезпеку й надалі становлять болотисті ґрунти, які через свої особливості є сприятливими для накопичення радіонуклідів. Удосконалення систем землеробства та впровадження технологій вирощування сільгоспкультур забезпечують отримання якісної продукції, збереження родючості ґрунтів і екологічну рівновагу на радіаційно забруднених територіях (Drebot et al., 2022). У проведених дослідженнях виявлено, що після 37-річного періоду від аварії на Чорнобильській атомній електростанції найвищий вміст цезію-137 виявлено на перезволожених луках. В умовах абсолютних та нормальних суходолах вміст даного ізотопу виявився нижчим. Причому в умовах зазначених суходолів спостерігалась вища інтенсивність зниження у ґрунтах цезію-137 порівняно із суходолами надмірного зволоження. Тобто, фактор зниження вмісту цезію-137 на перезволожених ґрунтах за рахунок високої інтенсивності винесення цього токсиканта з травостоєм не підтвердився.

Moisiienko V.V. (2006) вважає, що забрудненість травостою ¹³⁷Cs, залежить від щільності забруднення, типу луків і їх видової різноманітності, оскільки різні рослини мають різну здатність до накопичення радіонуклідів. Datsko O.M. & Yatsenko V.M. (2024) стверджують, що використання рослин-гіперакумуляторів є ефективним методом зниження концентрації токсичних речовин у ґрунтах. Такий підхід сприяє покращенню екологічного

стану та створює умови для відновлення біорізноманіття, що є важливим кроком на шляху до екологічної реабілітації постраждалих регіонів. За результатами досліджень, в умовах перезволожених суходолів зростали переважно осокові трави, які протягом 37 років не використовувалися в якості кормової сировини, тоді як в умовах абсолютних і нормальних суходолів спостерігається активне видалення рослинності з природних угідь за рахунок випасання її тваринами.

Висновки. За результатами досліджень встановлено, що в умовах Лісостепу правобережного вміст цезію-137 у сірому лісовому ґрунті природних кормових угідь знаходився у такій зростаючій послідовності: нормальні суходоли – абсолютні суходоли – суходоли надмірного зволоження. Найнижчий міст цезію-137 у сірому лісовому ґрунті спостерігався в умовах нормальних суходолів, тоді як найвищий – у ґрунтах суходолів надмірного зволоження.

Найвищу різницю за період 2019–2024 рр. по вмісту цезію-137 у сірих лісових ґрунтах виявлено в умовах нормальних суходолів, які характеризуються високою злаково-бобовою рослинністю та активним використанням під випас великої рогатої худоби.

Вміст цезію-137 у сірому лісовому ґрунті природних кормових угідь абсолютних, нормальних суходолів та суходолів надмірного зволоження Вінниччини не перевищує доаварійний на Чорнобильській АЕС рівень 1 Кі/км².

Бібліографічні посилання:

1. Baranovskyi, M. O., & Baranovska, O. V. (2016). Radiatsiine zabrudnennia terytorii Chernihivskoi oblasti: osoblyvosti, dynamika ta naslidky [Radiation contamination in Chernihiv region: characteristics, dynamics, and consequences]. *Fizychna heohrafiia ta heomorfolohiia*, 3 (83), 48–54 (in Ukrainian).
2. Bohovin, A. V., Saiko, V. F., & Ptashnyk, M. M. (2012). Pidvyshchennia produktyvnosti luk-pasovyshchnykh uhid na osushenykh nyzynnykh torfovyyshchakh Polissia [Improving the productivity of meadow-pasture lands on drained lowland peatlands of Polissya]. *Zemlerobstvo*, 84, 11–17 (in Ukrainian)
3. Bulyhin, S. Yu., Prister, B. S., Furdychko, O. I., & Dutov, O. I. (2012). Shchodo prohramy bezpechnoho vedennia silskohospodarskoho vyrobnytstva na terytoriiakh, zabrudnenykh radionuklidamy vnaslidok Chornobylskoi katastrofy [Regarding the program for safe agricultural production on territories contaminated with radionuclides due to the Chernobyl disaster]. *Visnyk ahrarynoi nauky*, 5, 53–57 (in Ukrainian).
4. Chobotko, H. M., Kuchma, M. D., Landin, V. P., Raichuk, L. A., Shvydenko, I. K., Tarariko, M. Yu., Umansky, M. S., Teteruk, O. R., Solomko, V. L., Kominar, M. F., & Liabakh, S. V. (2020). Rekomendatsii z reabilitatsii radioaktyvno zabrudnenykh zemel i vidrodzhennia ahropromysloвого vyrobnytstva na radioaktyvno zabrudnenykh terytoriiakh [Recommendations for rehabilitating radioactively contaminated lands and restoring agro-industrial production in contaminated territories]. DIA, Kyiv (in Ukrainian).
5. Datsko O.M., Yatsenko V.M. (2024). Suchasni metody remediatsii gruntiv. Fitoremediatsiia yak kliuch do ochyshchennia gruntiv ta zberezhenia ekosystem [Modern methods of soil remediation. Phytoremediation as the key to soil cleaning and ecosystem preservation]. *Ahrarni innovatsii*, 25, 20–24. doi: 10.32848/ahrar.innov.2024.25.3 (in Ukrainian).
6. Datsko, O. M., & Yatsenko, V. M. (2024). Suchasni metody remediatsii gruntiv. Fytoremediatsiia yak kliuch do ochyshchennia gruntiv ta zberezhenia ekosystem [Modern soil remediation methods. Phytoremediation as a key to soil purification and ecosystem preservation]. *Ahrarni innovatsii*, 25, 20–24 (in Ukrainian). doi: 10.32848/ahrar.innov.2024.25.3
7. Deisan M.M. et al. (2011). Rekomendatsii po vedenniu silskohospodarskoho vyrobnytstva v umovakh radioaktyvnoho zabrudnennia pivnichnykh raioniv Zhytomyrshchyny postrazhdalyykh u rezultati avarii na Chornobylskii AES na period 2011–2016 rr [Recommendations for conducting agricultural production in conditions of radioactive contamination of the northern regions of Zhytomyr region affected by the Chernobyl nuclear power plant accident for the period 2011–2016.]. Korosten: Druk, 1. S. 4–5 (in Ukrainian).
8. Drebot, O.I., Demianiuk, O.S. & Raichuk, L.A. (2022). Naukovo-metodychni zasady reabilitatsii radioaktyvno zabrudnenykh ahrolandshaftiv u konteksti Zelenoi ekonomiky [Scientific and methodological principles of rehabilitation of radioactively contaminated agricultural landscapes in the context of the Green Economy]. *Visnyk ahrarynoi nauky*, 100, 2 (827), 74–81. DOI: 10.31073/agrovisnyk 202202-10 (in Ukrainian).
9. Drebot, O. I., Demianiuk, O. S., & Raichuk, L. A. (2022). Naukovo-metodychni zasady reabilitatsii radioaktyvno zabrudnenykh ahrolandshaftiv u konteksti Zelenoi ekonomiky [Scientific-methodological principles of rehabilitating radioactively contaminated agrolandscapes in the context of the Green Economy]. *Visnyk ahrarynoi nauky*, 100 (2), 74–81 (in Ukrainian). doi: 10.31073/agrovisnyk202202-10
10. Dutov O.I. (2014). Ahroekolohichni pidkhody do minimizatsii doz oprominennia naseleння u viddalenyi period rozvytku radiolohichnoi sytuatsii pislia avarii na ChAES [Agroecological approaches to minimizing radiation doses to the population in the long-term development of the radiological situation after the Chernobyl accident]. *Ekolohichni nauky. DAE, Kyiv*: 1(5), 24–30 (in Ukrainian).
11. Dutov, O. I., & Abidov, S. T. (2015). Radiatsiino-ekolohichni pidkhody do ratsionalnogo vykorystannia zabrudnenykh zemel dlia vyrobnytstva bezpechnoi silskohospodarskoi produktsii [Radiation-ecological approaches to the rational use of contaminated lands for the production of safe agricultural products]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia*, 1, 89–93 (in Ukrainian).
12. Furdychko, O. I. (2016). Radioekolohichna bezpeka ahrarynykh i lisovykh ekosystem u viddalenyi period pislia avarii na ChAES [Radioecological safety of agrarian and forest ecosystems in the distant period after the Chernobyl disaster]. *Ahroekolohichni zhurnal*, 1, 6–14 (in Ukrainian).
13. Havrysh, N. S. (2016). Vykorystannia, vidtvorennia ta okhrona gruntiv v Ukraini: teoretyko-pravovi aspekty [Usage, restoration, and protection of soils in Ukraine: theoretical and legal aspects]. Yuryd. I-ra, Odessa (in Ukrainian).
14. Hryhora, I. M., & Yakubenko, B. E. (2001). Vysokotravnii bolotni ta luchno-bolotysti uhrupovannia Lisostepu Ukrainy [Tall wetland and meadow-wetland groups of the forest-steppe of Ukraine]. *Ahrarna nauka i osvita*, 1–2, 11–21 (in Ukrainian).
15. Hrynyk O.I. (2015). Osoblyvosti funktsionalnogo vykorystannia radioaktyvno zabrudnenykh silskohospodarskykh zemel Kyivskoho Polissia [Features of the functional use of radioactively contaminated agricultural lands of Kyiv Polissya]. *Ahrosvit*, 15, 73–77 (in Ukrainian).
16. Hrynyk, O. I. (2015). Osoblyvosti funktsionalnogo vykorystannia radioaktyvno zabrudnenykh silskohospodarskykh zemel Kyivskoho Polissia [Features of the functional use of radioactively contaminated agricultural lands in Kyiv Polissya]. *Ahrosvit*, 15, 73–77. (in Ukrainian)
17. Hudkov, I. M. (2016). Radiobiolohiia: pidruchnyk [Radiobiology: textbook]. OLDI-PLYUS, Kherson (in Ukrainian).
18. Hudkov, I. M., Kashparov, V., & Paryeniuk, O. (2018). Radioekolohichni monitorynh: navch. posib. [Radioecological Monitoring: teaching aid]. Kyiv, 55–65. (in Ukrainian)
19. Jeong, S.-W., & Choi, Y. J. (2017). Research Perspective of an Extremophilic Bacterium. *Deinococcus radiodurans* on Bioremediation of Radioactive Wastes. *Applied Chemistry for Engineering*, 28 (2), 133–140. doi: 10.14478/ace.2017.1003

20. Khomutinin, Yu. V., Kosarchuk, O. V., Polishchuk, S. V., Lazaryev, M. M., Levchuk, S. E., & Pavlyuchenko, V. V. (2022). Otsinka mozhyvosti povernennia do hospodarskoho obihu vyvedenykh, vnaslidok avarii na ChAES, pasovysch i sinozhatok [Assessment of the possibility of returning withdrawn pastures and hayfields into agricultural circulation due to the Chernobyl accident]. *Yaderna fizyka ta enerhetyka*, 23 (1), 47–56. doi: 10.15407/jnpae2022.01.047 (in Ukrainian)
21. Kovalenko, V. P. (2012). Biolohe-tekhnologichni peredumovy oderzhannia vysokoiakistnykh kormiv [Biological-technological prerequisites for obtaining high-quality feeds]. *Kormy i kormovyrobnytstvo*, 74, 41–47. (in Ukrainian)
22. Landin, V. P. (2016). Radiatsiino-ekolohichni problemy vidnovlennia silskohospodarskoho vyrobnytstva v Ukrainському Polissi [Radiation-ecological issues of agricultural production recovery in Ukrainian Polissya]. *Ahroekolohichni zhurnal*, 1, 88–93 (in Ukrainian).
23. Landin, V. P., Chobotko, H. M., Tarariko, M. Yu., Raichuk, L. A., & Shvydenko, I.K. (2018). Ekolohichno-ekonomichni zasady reabilitatsii radioaktyvno zabrudnenykh zemel Polissia [Ecological-economic principles for rehabilitating radioactively contaminated lands in Polissya]. *Ahrarna nauka*, Kyiv (in Ukrainian).
24. Lopushniak, V. I., Avhustynovych, M. B., & Bortnik, T. P. (2016). Vplyv ekolohichno bezpechnykh tekhnolohii na balans pozhyvnykh rehovyn u siromu lisovomu hrunti zakhidnoho Lisostepu Ukrainy [Impact of environmentally safe technologies on nutrient balance in gray forest soil of the western forest-steppe of Ukraine]. *Visnyk Lvivskoho NAU. Ahromoniia*, 20, 149–155 (in Ukrainian).
25. Makarenko, P. S. (2008). Luchne i polove kormovyrobnytstvo [Meadow and field fodder production]. V.H., Vinnytsia, FOP Danyliuk (in Ukrainian).
26. Melnyk, V. V. (2020). Osoblyvosti rozpodilu ¹³⁷Cs u komponentakh lisovoho bioheotsenoza svizhykh boriv Ukrainського Polissia [Features of ¹³⁷Cs distribution in the components of the forest biogeocenosis of fresh pine forests in Ukrainian Polissya]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, 2, 88–98 (in Ukrainian).
27. Moisiienko V.V. & Shevchuk O.Ia. (2006). Ekolohichni stan, shliakhy polipshennia i produktyvnist pryrodnykh kormovykh uhid v umovakh radioaktyvnoho zabrudnennia Polissia Ukrainy [Ecological condition, ways of improvement and productivity of natural forage lands in conditions of radioactive contamination of Polissya, Ukraine]. *Tem. mizhvid. nauk. zb. "Kormy i kormovyrobnytstvo"*, 58, 9–196 (in Ukrainian).
28. Moosavi, S. G., & Mohamd, J. S. (2013). Phytoremediation: a review. *Advance in Agriculture and Biology*, 1 (1), 5–11.
29. Mudrak, O. V. (2011). Ekolohichni stan dovkillia Vinnytskoi oblasti: navch.-metod. posib. [Environmental status of Vinnytsia region: teaching-methodological manual]. Vinnytsia (in Ukrainian).
30. Olifirovych, V. O. (2018). Produktyvnist bahatorichnykh ahrofytotensoziv zalezho vid skladu travosumishok i rezhymu yikh vykorystannia [Productivity of perennial agro-phytocenoses depending on the composition of grass mixtures and their usage mode]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 3, 13–17 (in Ukrainian).
31. Omelianets, M. I., Piven, N. V., Hunko, N. V., Korotkova, N. V., & Sribna, V. D. (2014). Stan radioaktyvnoho zabrudnennia produktiv kharchuvannia ta osoblyvosti yikh spozhyvannia meshkantsiamy naibilsh radioaktyvno zabrudnenykh terytorii Ukrainy u viddalenyi period likvidatsii naslidkiv Chornobylskoi katastrofy [Radioactive contamination of food products and peculiarities of their consumption by residents of the most contaminated areas of Ukraine in the distant period after the Chernobyl disaster]. *Problemy radiatsiinoi medytsyny ta radiobiolohii*, 19, 126–135 (in Ukrainian).
32. Petrychenko, V. F. (2010). Aktualni problemy kormovyrobnytstva v Ukraini [Current issues of fodder production in Ukraine]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 10, 18–21 (in Ukrainian).
33. Razanov, S. F., Shevchuk, V. V., & Kominar, M. F. (2021). Vplyv obrobky hruntu na nakopychennia ¹³⁷Cs u kvitkovomu pylku ta u produktakh pererobky yoho medonosnoi bdzholoiu [Effect of soil cultivation on ¹³⁷Cs accumulation in pollen and its processing products by honey bees]. *Silske hospodarstvo ta lisivnytstvo*, 3 (22), 161–173 (in Ukrainian). doi: 10.37128/2707-5826-2021-3-13
34. Romanchuk, L. D. (2015). Radioekolohichna otsinka formuvannia dozovoho navantazhennia u meshkantsiv silskykh terytorii Polissia Ukrainy [Radioecological assessment of dose load formation in rural residents of Polissya, Ukraine]. *Polissia, Zhytomyr* (in Ukrainian).
35. Romanchuk, L. D., Lopatyuk, O. V., & Kovalova, S. P. (2019). Otsinka vmistu radionuklidu ¹³⁷Cs u produktakh kharchuvannia meshkantsiv radioaktyvno zabrudnenykh terytorii u viddalenyi period pislia avarii na ChAES [Assessment of ¹³⁷Cs content in food products consumed by residents of radioactively contaminated areas in the distant period after the Chernobyl accident]. *Naukovi horyzonty*, 8 (81), 82–86. (in Ukrainian). doi: 10.33249/2663-2144-2019-81-8-82-86
36. Singh, B. S. M., Singh, D., & Dhal, N. K. (2022). Enhanced phytoremediation strategy for sustainable management of heavy metals and radionuclides. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 5, 100–176. doi: 10.1016/j.csee.2021.100176
37. Vedennia silskohospodarskoho vyrobnytstva na terytoriiakh, zabrudnenykh vnaslidok Chornobylskoi katastrofy, u viddalenyi period [Conducting agricultural production in the territories contaminated as a result of the Chernobyl disaster in the long term]. navch. vyd. za red. akad. UAAN B. S. Pristera (2007). Kyiv: TOV VPF «MEHA» (in Ukrainian).
38. Vedennia silskohospodarskoho vyrobnytstva na terytoriiakh, zabrudnenykh vnaslidok Chornobylskoi avarii, u viddalenyi period [Conducting agricultural production in the territories contaminated as a result of the Chernobyl accident in the long term]: Metodichni rekomendatsii. Za zah. red. akad. B.S. Pristera (2007). Atika-N (in Ukrainian).

Didur I. M., Doctor (Agricultural Sciences), Professor, Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

Aleksiev O. O., PhD (Agricultural Sciences), Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

Pantsyreva H. V., PhD (Agricultural Sciences), Associate Professor, Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

Pryimak Y. S., PhD student, Lviv National University of Environmental Sciences, Lviv, Ukraine

Radioecological assessment of gray forest soil in natural meadows of the right-bank forest-steppe 37 years after the Chernobyl NPP accident

The technogenic load on natural forage lands increases annually due to human activity. Among pollutants, radionuclides are the most dangerous for living organisms. In an exchangeable form and migrating through natural ecosystems, radionuclides enter living organisms, causing various disruptions at cellular, organ, and organismal levels. Irradiation-related disturbances lead to a range of diseases, which result in immune system suppression. The primary pathway for radionuclides into living organisms is the food chain. Radionuclides in a soluble form from soils accumulate in plants, transferring to plant products, and eventually enter the human body through consumption. To reduce radiation exposure on the population, several measures are used to hinder radionuclide migration in the soil → plant → human system. The main ones include agrotechnical measures, in particular, soil cultivation, the use of sorbents, mineral fertilizers, specialization in the field of crop production, and others. However, these measures are less effective in natural meadows, so their vegetation must be constantly monitored. The problems of using agrotechnical measures to reduce the migration of radionuclides in the soil → vegetation system in the conditions of natural meadows are primarily due to high economic costs and the impossibility of their effective use. Natural meadows before the application of agrotechnical measures to reduce the migration of radionuclides into vegetation require additional costs for the preparation of areas for rehabilitation, moreover, the uneven terrain does not allow the effective use of agrotechnics. Monitoring for cesium-137 contamination of natural forage meadows in Vinnitsa showed that its concentration in gray forest soils does not exceed pre-Chernobyl accident levels, ranging from 0.105 Ki/km² to 0.247 Ki/km². Research indicates that, in the right-bank forest-steppe, cesium-137 content in gray forest soil of natural forage meadows follows this increasing order: normal drylands → absolute drylands → excessively moist drylands. The lowest cesium-137 content in gray forest soil was observed in normal drylands, while the highest was in excessively moist drylands. The greatest difference in cesium-137 content in gray forest soils from 2019 to 2024 was found in normal drylands, characterized by abundant grass-legume vegetation and active cattle grazing, while the smallest difference was observed in overly moist meadows, whose forage material is less suitable for livestock feeding. That is, the productivity of natural meadows and the intensity of use of their vegetation by animals has a significant impact on the radiological state of natural meadows. Radionuclides, being in an exchangeable form along the trophic chain, accumulate in vegetation, and as they are consumed by animals, they also accumulate in their bodies. In territories with vegetation that is not suitable for animal consumption, the removal of cesium-137 due to phytoremediation is not very effective, which is characteristic of over moistened meadows where sedge grows mainly.

Key words: natural meadows, soils, contamination, radionuclides, cesium-137, phytoremediation.