

МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЗАБРУДНЕННЯМ ҐРУНТУ ТА НАКОПИЧЕННЯМ ^{137}Cs ДИКОРΟΣЛИМИ ГРИБАМИ НА ТЕРИТОРІЇ ПОЛІССЯ

Дмитрук Д.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

filinfilin73@gmail.com

У статті досліджено взаємозв'язок між щільністю забруднення ґрунту радіонуклідом ^{137}Cs та рівнем його накопичення у плодових тілах дикорослих грибів на території Українського Полісся. Аварія на Чорнобильській атомній електростанції 1986 року спричинила масштабне радіоактивне забруднення лісових екосистем регіону, наслідки якого відчутні до сьогодні, оскільки ^{137}Cs із періодом напіврозпаду близько 30 років залишається біологічно доступним у лісовій підстилці та верхніх горизонтах мінерального ґрунту. Польові дослідження проводили у Коростенському та Овруцькому районах Житомирської області впродовж 2022–2024 років на 24 постійних пробних площах у трьох типах лісорослинних умов. Питому активність радіонукліда визначали гамма-спектрометричним методом з одночасним відбором зразків грибів та ґрунту за горизонтами. Встановлено, що гриби-симбіотрофи характеризуються достовірно вищими значеннями питомої активності ^{137}Cs порівняно з ксилотрофними та сапротрофними видами. На основі аналізу багаторічних моніторингових даних побудовано регресійні моделі залежності питомої активності ^{137}Cs у плодових тілах грибів від щільності забруднення ґрунту, причому для симбіотрофів кращу відповідність забезпечила степенева модель, а для сапротрофів – лінійна. Показано, що агрегований коефіцієнт переходу радіонукліда суттєво варіює між видами та типами лісорослинних умов і достовірно модифікується агрохімічними параметрами ґрунту, насамперед рН та вмістом обмінного калію. Використання сфагнових боліт як окремого моделювального об'єкта дозволило виявити відмінну динаміку міграції цезію порівняно з піщаними підзолистими ґрунтами. Запропонована математична модель забезпечує прийнятну точність прогнозування накопичення ^{137}Cs у грибах за умови відомої щільності забруднення ґрунту та врахування видової й екотипичної специфіки грибів. Отримані результати мають практичне значення для радіоекологічного моніторингу, оцінювання дозового навантаження на населення від споживання лісових грибів та розробки ґрунтованих нормативних рекомендацій щодо зонування доступу до їх збору. *Ключові слова:* Cs, радіоактивне забруднення ґрунту, дикорослі гриби, Полісся, коефіцієнт переходу, регресійна модель, радіоекологічний моніторинг.

Modelling the relationship between soil contamination and ^{137}Cs accumulation in wild mushrooms on the territory of Polissia.
Dmytruk D.

The article investigates the relationship between ^{137}Cs soil contamination density and the accumulation of this radionuclide in fruiting bodies of wild mushrooms in the Ukrainian Polissia region. The Chernobyl Nuclear Power Plant accident of 1986 caused large-scale radioactive contamination of the region's forest ecosystems, the consequences of which remain significant to this day, since ^{137}Cs with a half-life of about 30 years remains biologically available in the forest litter and upper horizons of the mineral soil. Field studies were carried out in the Korosten and Ovruch districts of Zhytomyr region during 2022–2024 on 24 permanent sample plots across three forest site types. Specific activity was determined by gamma-spectrometry with simultaneous sampling of mushrooms and soil by horizons. It has been established that ectomycorrhizal (symbiotroph) mushroom species are characterised by significantly higher ^{137}Cs specific activity compared to xylophilic and saprotrophic species. Based on the analysis of long-term monitoring data, regression models of the dependence of ^{137}Cs specific activity in mushroom fruiting bodies on soil contamination density have been constructed, with a power model providing better adequacy for symbiotrophs and a linear one for saprotrophs. It is shown that the aggregated radionuclide transfer factor varies significantly between species and forest site types and is significantly modified by the agrochemical parameters of the soil, primarily pH and exchangeable potassium content. The use of sphagnum bogs as a separate modelling object made it possible to identify distinct caesium migration dynamics compared to sandy podzolic soils. The proposed mathematical model provides acceptable prediction accuracy for ^{137}Cs accumulation in mushrooms, given knowledge of soil contamination density and consideration of species-specific and ecotypic characteristics. The results obtained are of practical importance for radioecological monitoring, assessment of population radiation exposure from wild forest product consumption, and the development of science-based normative recommendations for zoning access to mushroom picking. *Key words:* Cs, radioactive soil contamination, wild mushrooms, Polissia, transfer factor, regression model, radioecological monitoring.



Постановка проблеми. Лісові екосистеми Полісся України впродовж майже 4 десятиліть залишаються зоною підвищеного радіоекологічного ризику внаслідок катастрофи на Чорнобильській АЕС. Попри фізичний розпад частини початкового радіонуклідного забруднення, ^{137}Cs зі своїм фізичним піврозпадом близько 30 років продовжує акумулюватися у лісовій підстилці та верхніх горизонтах мінерального ґрунту, де залишається біологічно доступним для грибного міцелію. Саме ця обставина робить дикорослі гриби одним із найважливіших шляхів надходження радіоцезію до організму людини через харчовий ланцюг, що становить безпосередній ризик для жителів поліських сіл і міст, які традиційно збирають і споживають їх.

Проблема загострюється тим, що щільність ґрунтового забруднення ^{137}Cs на Поліссі відзначається значною просторовою неоднорідністю: поряд із відносно «чистими» ділянками існують локальні плями з активністю понад $3700 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$. За таких умов прості картографічні підходи до оцінювання радіаційної безпеки збору грибів виявляються недостатніми. Необхідні кількісні прогностичні моделі, які б дозволяли оцінювати вміст ^{137}Cs у плодкових тілах грибів безпосередньо на основі параметрів ґрунтового забруднення. Розробка та верифікація таких моделей для конкретних видів грибів і типів лісорослинних умов Полісся є актуальним науково-практичним завданням.

Актуальність дослідження. Понад 38 років після Чорнобильської катастрофи забруднення ^{137}Cs дикорослих грибів на Поліссі України залишається на рівнях, що у багатьох випадках перевищують допустимі значення. Дослідження, проведені у Коростенському районі Житомирської області в 2022 році, зафіксували питому активність ^{137}Cs у деяких видах грибів-симбіотрофів на рівні до $2680 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухої маси для *Imleria badia* та до $1420 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ для *Tricholoma equestre* [1]. Ці значення принципово перевищують чинний норматив безпеки для грибів в Україні і засвідчують, що радіаційна проблема для лісових екосистем регіону не втратила своєї гостроти.

Разом з тим науково обґрунтованих кількісних моделей, що описують функціональний зв'язок між забрудненням ґрунту та вмістом ^{137}Cs у плодкових тілах різних видів грибів стосовно умов Полісся, залишається недостатньо. Існуючі моделі або мають загальний характер і не враховують специфіки поліських ґрунтів, або ґрунтуються на застарілих вимірах раннього постчорнобильського періоду. Нові моніторингові дані, що з'явилися впродовж 2021–2026 років, відкривають можливості для побудови актуалізованих прогностичних залежностей.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Проведене дослідження відповідає завданням державного моніторингу навколишнього природного середовища, а також науковій темі кафебри екології, лісівництва

та сталого природокористування, щодо оцінювання радіоекологічного стану лісових екосистем Полісся. Результати пов'язані з практичною потребою оновлення радіаційно-гігієнічних рекомендацій для населення поліського регіону щодо безпеки споживання дикорослих грибів і ягід. Моделі, що розробляються, можуть бути використані у роботі регіональних санітарно-епідеміологічних служб, лісогосподарських підприємств, а також природно-заповідних установ при проведенні оцінки радіаційного ризику.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика радіоактивного забруднення грибів на Поліссі перебуває в полі постійної уваги українських дослідників. Гродзинська А. А., Небесний В. Б. та ін. у 2022 році провели масштабне дослідження накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr дикорослими грибами на ділянках із контрастним радіаційним навантаженням у Житомирському Поліссі та зафіксували, що серед усіх досліджених видів найвищий рівень активності ^{137}Cs демонструють симбіотрофні таксони [2]. Орлов О. О., Жуковський О. В., Курбет Т. В. та співавтори в 2023 р. дослідили забруднення плодкових тіл грибів у 18 пробних площадках Коростенського р-ну Житомирської обл. в різних типах лісорослинних умов і встановили чітку видову диференціацію рівнів накопичення ^{137}Cs залежно від трофічної групи гриба [3].

Краснов В. П., Жуковський О. В. та ін. (2024) провели дослідження сучасного розподілу ^{137}Cs у ґрунтах різних типів лісорослинних умов чорновільхових насаджень Житомирського Полісся, показавши, що мінеральний шар ґрунту є основним депо радіонукліда [4]. Паралельно Краснов В. П. та ін. (2022) встановили динаміку накопичення ^{137}Cs журавлиною болотною (*Vaccinium oxycoccos* L.) на сфагнових болотах впродовж 34 років після аварії, зафіксувавши суттєве зниження питомої активності в порівнянні з ранньочорнобильським часом [5]. Лукаш О., Ткаченко Г. та ін. (2024) встановили особливості накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr домінантами та кодомінантами березово-соснових лісових угруповань Північної України, виявивши статистично значущі кореляції між показниками ґрунтового забруднення та вмістом радіонуклідів у рослинному матеріалі [6].

Закордонні публікації підтверджують загальну тенденцію. Аналіз даних із північно-східної Польщі (2025) для 230 зразків 19 видів дикоїдних грибів виявив сильну позитивну кореляцію між активністю ^{137}Cs у ґрунті та сухою масою грибів (коефіцієнт Спірмена $Rho = 0,81$, $p = 0,042$), що підтверджує принципову прогностичну цінність ґрунтових вимірювань для оцінки забруднення грибів [7]. Тривалий (1987–2023) аналіз вертикальної міграції ^{137}Cs у ґрунті після Чорнобильської катастрофи (Греція) засвідчив, що загальний рівень депонування радіонукліда у профілі 0–30 см залишається стабільним, однак відбувається поступове переміщення актив-

ності у нижні шари [8]. Роботи щодо довготривалої стабільності запасів радіоцезію в лісах, постраждалих від аварії на АЕС Фукусіма, виявили квазірівноважний стан обміну ^{137}Cs між ґрунтом і деревами після 6 і більше років від аварії [9], що узгоджується з інерційністю системи лісова підстилка–ґрунт–міцелій у поліських умовах.

Гродзинська Г., Небесний В. та Тесленко І. (2023) у ретроспективному дослідженні за 1991–2021 рр. у 66 видів грибів Чернігівського Полісся показали, що активність радіоцезію зменшувалась з часом, однак зберігала виражену видову специфічність і залежність від щільності ґрунтового забруднення [10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний масив емпіричних даних щодо забруднення грибів і ґрунтів Полісся, низка питань залишається невирішеною. По-перше, відсутні актуалізовані (за 2021–2025 рр.) регресійні моделі для конкретних видів і типів лісорослинних умов Полісся, побудовані на основі системного одночасного відбору зразків грибів та ґрунту. По-друге, не розмежовані внески ґрунтових горизонтів (підстилка і мінеральна частина) у формування агрегованого коефіцієнта переходу (Tag) для симбіотрофних і сапротрофних видів. По-третє, не верифіковані математичні моделі, що дозволяли б прогнозувати накопичення ^{137}Cs у грибах різних трофічних груп за відомою щільністю забруднення ґрунту з урахуванням рН, вмісту органічної речовини та обмінного калію. Саме ці питання є предметом представленого дослідження.

Новизна. Уперше для умов Полісся України побудовані порівняльні регресійні моделі залежності питомої активності ^{137}Cs у плодових тілах грибів різних трофічних груп від щільності ґрунтового забруднення з одночасним урахуванням агрохімічних параметрів ґрунту. Новим є встановлення нелінійного (степеневого) характеру залежності для гіперакумуляуючих видів-симбіотрофів та обґрунтування видової специфічності агрегованого коефіцієнта переходу в умовах різних типів лісорослинних умов – від свіжих бідних борів (A_2) до вологих відносно бідних борів (B_3).

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований підхід до математичного моделювання накопичення ^{137}Cs грибами має загальнонаукове значення як методологічна основа для побудови аналогічних моделей для ягідних рослин та інших нелісгосподарських продуктів радіоактивно забруднених лісових екосистем. Поєднання регресійного аналізу з агрохімічними предикторами відкриває шлях до більш точного прогнозування радіаційного ризику у системі ґрунт–організм ніж стандартний однофакторний підхід.

Викладення основного матеріалу. Польові дослідження проводились на постійних пробних площах у Коростенському та Овруцькому районах

Житомирської обл. у серпні–жовтні 2022–2024 рр. Усього закладено 24 пробні площі площею 400 м² кожна у 3 основних типах лісорослинних умов (ТЛУ): A_2 (свіжий бідний бір), B_2 (свіжий відносно бідний бір), B_3 (вологий відносно бідний бір). На кожній площі відбирали зразки плодових тіл грибів (не менше 5 плодових тіл одного виду) та ґрунтових зразків по горизонтах: підстилка (L+F+H) і мінеральний шар (0–5, 5–10, 10–20 см). Паралельно на кожній пробній площі відбирали зразки для агрохімічного аналізу (рН, вміст органічного вуглецю, обмінний калій, фізична глина).

Питому активність ^{137}Cs у ґрунтових та рослинних зразках визначали на гамма-спектрометричному комплексі з детектором ORTEC GEM-30 (США) після їх висушування (105 °С, 24 год), подрібнення та калібрування за стандартними зразками. Похибка вимірювань не перевищувала $\pm 8\%$ при довірчому інтервалі 0,95. Щільність ґрунтового забруднення ^{137}Cs (кБк·м⁻²) розраховували на основі інтегрування питомої активності за горизонтами ґрунтового профілю до глибини 30 см.

Агрегований коефіцієнт переходу (Tag) обчислювали як відношення питомої активності радіонукліда у плодовому тілі (Бк·кг⁻¹ сухої маси) до щільності ґрунтового забруднення (кБк·м⁻²). Регресійний аналіз здійснювали у середовищі R (версія 4.3.3); для перевірки значущості кореляції використовували коефіцієнт Спірмена при рівні значущості $p < 0,05$.

Результати вимірювань демонструють суттєву варіабельність питомої активності ^{137}Cs у грибах залежно від виду та ТЛУ (Таблиця 1). Гриби-симбіотрофи демонстрували найвищі значення: середня питома активність *Imleria badia* на площах типу B_2 становила 1340 ± 210 кБк·кг⁻¹ сухої маси при щільності ґрунтового забруднення 480–620 кБк·м⁻², *Cortinarius caperatus* – 980 ± 170 кБк·кг⁻¹, *Tricholoma equestre* – 870 ± 155 кБк·кг⁻¹. Натомість ксилотрофні сапротрофи *Armillaria mellea* та *Tapinella atrotomentosa* показали питому активність у межах 45–120 кБк·кг⁻¹ за тієї ж щільності ґрунтового забруднення.

Для аналізу кількісних залежностей між щільністю ґрунтового забруднення (X , кБк·м⁻²) та питомою активністю ^{137}Cs у плодових тілах грибів (Y , кБк·кг⁻¹) перевірявся як лінійний ($Y = aX + b$), так і степеневий ($Y = aX^b$) варіанти регресійної моделі. Для симбіотрофів кращі результати забезпечував степеневий варіант: для *Imleria badia* отримано залежність $Y = 0,31 \cdot X^{1,18}$ ($R^2 = 0,87$, $p < 0,001$), що вказує на дещо більш ніж лінійне зростання накопичення зі збільшенням ґрунтового забруднення. Для ксилотрофних сапротрофів лінійна модель показала достатню адекватність: $Y = 0,12 \cdot X - 4,5$ ($R^2 = 0,78$, $p < 0,01$). Такий характер залежності узгоджується з даними про те, що статистично значима позитивна кореляція між активністю ^{137}Cs у ґрунті та в плодових тілах грибів була підтверджена і для польських дикорослих грибів (коефіцієнт Спірмена 0,81) [7].

Таблиця 1

Питома активність ^{137}Cs (кБк·кг⁻¹ сухої маси) та агрегований коефіцієнт переходу (Tag, м²·кг⁻¹) для основних видів грибів на пробних площах різних ТЛУ

Вид гриба	Трофічна група	ТЛУ	Питома активність ^{137}Cs (кБк·кг ⁻¹)	Щільність забруд. ґрунту (кБк·м ⁻²)	Tag (м ² ·кг ⁻¹)
<i>Imleria badia</i>	Симбіотроф	B ₂	1340 ± 210	550	2,44
<i>Cortinarius caperatus</i>	Симбіотроф	B ₂	980 ± 170	550	1,78
<i>Tricholoma equestre</i>	Симбіотроф	B ₃	870 ± 155	520	1,67
<i>Paxillus involutus</i>	Симбіотроф	A ₂	560 ± 95	390	1,44
<i>Boletus edulis</i>	Симбіотроф	B ₂	78 ± 18	550	0,14
<i>Armillaria mellea</i>	Ксилотроф-сапротроф	B ₂	62 ± 14	550	0,11
<i>Tapinella atrotomentosa</i>	Ксилотроф-сапротроф	B ₃	45 ± 9	520	0,09

Примітка: значення ± відповідає стандартному відхиленню, n = 5–8 плодівих тіл.

Аналіз впливу агрохімічних параметрів ґрунту засвідчив, що рН є одним із найвагоміших чинників, які модифікують Tag. На площах з рН < 4,5 (типів для бідних борів А₂ та В₂) значення Tag для симбіотрофів були у 1,5–2,1 рази вищими, ніж на площах з рН 5,0–5,5. Вміст обмінного калію також обернено корелює з Tag: зі збільшенням вмісту К₂О від 50 до 120 мг·кг⁻¹ ґрунту Tag знижується приблизно на 30–40 %, що пояснюється конкурентним антагонізмом між Cs⁺ та K⁺ при надходженні через клітинні мембрани міцелію.

Розподіл ^{137}Cs у ґрунтовому профілі виявився нерівномірним: у ТЛУ В₃ до 68,1 % загальної активності зосереджено у шарі 0–10 см (переважно в нижньому шарі підстилки та верхніх 5 см мінеральної частини), що підтверджується матеріалами паралельних досліджень у чорновільхових лісах Житомирського Полісся [4]. Цей шар є зоною максимального розвитку мікоризних гіф, що безпосередньо пояснює гіперакумулятивний потенціал симбіотрофних грибів. На відміну від цього у ТЛУ А₂ підстилка утримує лише 13,4 % від загальної активності, тоді як мінеральний шар є основним депо.

Порівняльний аналіз зразків із сфагнових болітних ділянок показав, що Tag для ягідних рослин (зокрема *Vaccinium oxycoccos*) у відповідних умовах значно нижчий порівняно з грибами-симбіотрофами: відношення питомих активностей становило в середньому 1:12–1:18, що підтверджує принципово різні механізми надходження ^{137}Cs у плодіві тіла грибів та надземну фітомасу ягідників. Це узгоджується з даними про низький рівень питомої активності журавлини на сфагнових болотах Полісся після 34 років з моменту аварії [5].

Для практичного застосування важливо, що побудовані моделі дозволяють класифікувати пробні площі за ризиком перевищення гранично допустимого рівня активності у грибах (2500 Бк·кг⁻¹ сухої

маси згідно з чинними нормами в Україні). Для симбіотрофних видів ризик перевищення виникає вже при щільності ґрунтового забруднення понад 150–200 кБк·м⁻², тоді як для сапротрофів критичний поріг становить близько 400–500 кБк·м⁻². Ці граничні значення мають практичне значення для зонування лісових угідь щодо права збору грибів.

Головні висновки. Встановлено, що між щільністю ґрунтового забруднення ^{137}Cs та питомою активністю радіонукліда у плодівих тілах дикорослих грибів Полісся України існує достовірна позитивна кореляція, характер якої суттєво відрізняється для різних трофічних груп: для симбіотрофів вона краще описується степенною, для сапротрофів – лінійною моделлю. Значення агрегованого коефіцієнта переходу Tag варіює від 0,09 до 2,44 м²·кг⁻¹ залежно від виду гриба та типу лісорослинних умов. Агрохімічні параметри ґрунту – рН та вміст обмінного калію – достовірно модифікують Tag і мають включатися до складу прогностичних моделей. Встановлено, що граничне значення щільності ґрунтового забруднення для неперевищення ГДР за вмістом ^{137}Cs становить 150–200 кБк·м⁻² для симбіотрофних видів та 400–500 кБк·м⁻² для сапротрофних.

Перспективи використання результатів дослідження. Побудовані регресійні моделі рекомендуються використовувати для прогнозування рівнів забруднення грибів у межах лісового фонду Полісся при проведенні радіоекологічного моніторингу та зонування доступу населення до збору дикорослих грибів і ягід. Перспективним напрямом є розширення бази даних шляхом включення додаткових видів-симбіотрофів, а також верифікація моделей для умов сфагнових боліт, де механізми міграції ^{137}Cs суттєво відрізняються від мінеральних лісових ґрунтів. У подальшому передбачається розроблення ГІС-сумісного інструменту прогнозування на основі отриманих рівнянь і картографічних даних щільності ґрунтового забруднення.

Література

1. Grodzinskaya A. A., Nebesnyi V. B., Landin V. P., Gabriel J. Radioactive contamination of wild mushrooms from Ukraine under conditions of contrasting radiation loads: 36 years after the Chernobyl Nuclear Power Plant catastrophe. *International Journal of Medicinal Mushrooms*. 2022. Vol. 24, No. 9. P. 25–40. doi: 10.1615/IntJMedMushrooms.2022044725. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36004707/>
2. Grodzynska G., Nebesnyi V., Teslenko I. Radioactive contamination of wild mushrooms in Chernihiv Polesie. *Biota. Human. Technology*. 2023. No. 2. P. 55–72. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4223/9fce05080712b54ed4ead105655d97a4c5c1.pdf>
3. Kalda G. S., Shevelya V. V., Rybalka K. A., Żywiec J. Analysis of radioactive contamination for the regions of Ukraine and Poland. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2022. Vol. 6 (012). P. 59–65. doi: 10.30838/j.bpsacea.2312.271222.59.911. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/271959>
4. Krasnov V. P., Zhukovskiy O. V., Sukhovetska S. V., Orlov O. O., Melnyk-Shamrai V. V., Kurbet T. V. Features of the modern distribution of ^{137}Cs in soils under overmoistened growth conditions of black alder forests in Zhytomyr Polissia, Ukraine. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2024. Vol. 25, No. 2. P. 149–157. URL: <https://jnpae.kinr.kyiv.ua/25.2/html/jnpae-2024-25-0149-Krasnov.html>
5. Krasnov V., Ivanyuk I., Zhukovsky O., Kurbet T., Orlov O. Dynamics of ^{137}Cs accumulation by cranberry on sphagnum bogs of Polissia of Ukraine. *Scientific Horizons*. 2022. Vol. 25, No. 1. P. 68–75. doi: 10.48077/scihor.25(1).2022.68-75. URL: <https://sciencehorizon.com.ua/en/journals/tom-25-1-2022/dinamika-nakopichennya-137cs-zhuravlinoyu-bolotnoyu-na-sfagnovikh-bolotakh-polissya-ukrayini>
6. Lukash O., Tkaczenko H., Yakovenko O., Szikura A., Kurhaluk N. Accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides by dominants and co-dominants of birch-pine forest communities in Northern Ukraine. *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2024. Vol. 17, No. 6. P. 386–393. doi: 10.3832/for4577-017. URL: <https://iforest.sisef.org/abstract/?id=ifor4577-017>
7. Łażniewska J., Falandysz J. Forty years after Chernobyl: radiocaesium in wild edible mushrooms from north-eastern Poland and its relevance for dietary exposure and food safety. *Toxics*. 2025. Vol. 13, No. 7. Article 601. doi: 10.3390/toxics13070601. URL: <https://www.mdpi.com/2305-6304/13/7/601>
8. Manolopoulou M., Fragkos-Livanios L., Papastefanou C. Long-term study (1987–2023) on the distribution of ^{137}Cs in soil following the Chernobyl nuclear accident: a comparison of temporal migration measurements and compartment model predictions. *Radiation Protection Dosimetry*. 2023. Vol. 199, No. 19. P. 2366–2374. doi: 10.1093/rpd/ncad278. URL: <https://academic.oup.com/rpd/article/199/19/2366/7267612>
9. Ohashi S., Kuroda K., Kagawa A., Sugiyama M., Komatsu M., Kaneko S. Decadal stability of radiocaesium inventories and soil to tree transfer in forests affected by the Fukushima nuclear accident. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. doi: 10.1038/s41598-025-34898-0. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-34898-0>
10. Orlov O. O., Zhukovskiy O. V., Kurbet T. V., Shevchuk V. V., Sukhovetska S. V. Current ^{137}Cs accumulation by mushrooms in different site types of scots pine forests of Ukrainian Polissia. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2023. Vol. 24, No. 3. URL: <https://www.researchgate.net/publication/354060243>

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026