



В. П. Краснов¹, О. В. Жуковский², В. В. Мельник-Шамрай¹

¹ Державний університет "Житомирська політехніка", м. Житомир, Україна

² Поліський філіал УкрНДЛГА ім. Г. М. Висоцького, с. Довжик, Україна

ЛІСОВА РАДІОЕКОЛОГІЯ В УКРАЇНІ – 40 РОКІВ З ЧАСУ АВАРІЇ НА ЧАЕС

Здійснено узагальнюваний аналіз вітчизняних і зарубіжних літературних джерел, у яких висвітлено результати радіоекологічних досліджень, проведених у лісових екосистемах як до аварії на Чорнобильській атомній електростанції, так і в регіонах та країнах, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок цієї катастрофи у перші 10-15 років після неї. Показано, що основні наукові дослідження були зосереджені на вивченні впливу іонізуючого випромінювання на різні види деревних порід, особливостях вертикальної та горизонтальної міграції радіонуклідів у лісових ґрунтах, процесах їх акумуляції у компонентах лісових екосистем, а також на оцінюванні внеску дозоутворювальних радіоізотопів у формування доз внутрішнього опромінення населення. Проаналізовано ключові публікації українських науковців різних наукових установ, які здійснювали комплексні дослідження у лісових екосистемах радіоактивно забруднених територій. Встановлено, що найдетальніше вивчено перерозподіл ¹³⁷Cs у ґрунтовому профілі в найпоширеніших у Поліссі України типах лісорослинних умов, тоді як у Лісостеповій зоні держави та щодо ⁹⁰Sr в обох природних зонах кількість подібних досліджень є значно меншою. Виявлено, що динаміку розподілу ¹³⁷Cs у часі в окремих компонентах лісових екосистем досліджено фрагментарно, що обмежує можливості повноцінного прогнозування довготермінових радіоекологічних процесів. З'ясовано, що достатньо ґрунтовно досліджено міграцію ¹³⁷Cs у трофічній системі "ґрунт → кормові рослини → внутрішні органи козулі європейської", а також особливості радіоактивного забруднення і часову динаміку вмісту радіонуклідів у дикорослих ягідних і лікарських рослинах та їстівних грибах, які мають важливе значення для формування доз внутрішнього опромінення населення. Встановлено, що проведені радіоекологічні дослідження у лісових екосистемах не повністю відповідають сучасним вимогам, які ставляться перед радіоекологічним моніторингом. Запропоновано переглянути методичні підходи до його проведення на території України. Наголошено на потребі актуалізації та вдосконалення нормативно-правових документів, що регламентують ведення лісового господарства на територіях, забруднених радіонуклідами, з урахуванням сучасних наукових даних.

Ключові слова: радіоактивне забруднення; лісові екосистеми; радіонукліди; реабілітація лісів; радіоекологічні дослідження.

Вступ / Introduction

Розвиток лісової радіоекології, як наукового напрямку у загальній радіоекології, розпочався після усвідомлення науковцями різних країн численних проблем, які виникли через потрапляння радіоактивних елементів до лісових екосистем і важливість останніх у їх затриманні, перерозподілі та впливі на життєздатність людей. Встановлено [52], що найважливішими джерелами природних і техногенних радіонуклідів, які надходили у довкілля, були і залишаються: шахти з добування уранової руди та підприємства зі збагачення урану; випробування ядерних зарядів у військових і мирних цілях; виробничі та аварійні викиди на підприємствах ядерно-паливного циклу, а також від використання ядерних установок на кораблях (військових і цивільних); місця збереження та перероблення радіоактивних відходів, які утворювалися у виробництві та використанні ядерних зарядів та матеріалів у мирних і військових цілях;

теплоелектричні станції, які працювали на вугіллі, нафті та газі; застосування мінеральних добрив. Саме у 50–60-х роках ХХ ст. відбувся інтенсивний розвиток відзначених вище спрямувань діяльності людини, а відтак і збільшення радіоактивного забруднення біосфери.

У цей самий період (1956 р.) американський науковець Юджин Одум [43], якого уряд США залучив до вивчення стану навколишнього середовища довкола ядерних підприємств, запропонував використовувати термін "радіоекологія", який з часом набув визнання та поширення. Треба зазначити, що на початку становлення радіоекології не було розділення її на напрями. Це відбулося з часом. Необхідність появи та розвитку радіоекології як науки визначено [8], передусім, прикладними завданнями – забезпеченням радіаційної безпеки населення, адже виявилось [44], що відбувається накопичення радіоактивних елементів у тих чи інших складових різних наземних та водних екосистем. Це призводило не тільки до зовнішнього опромінення людей, які

© Copyright 2026 by the author(s)

Краснов Володимир Павлович, д-р с.-г. наук, професор, кафедра екології та природоохоронних технологій.

Email: volodkrasnov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-1779-9544>

Жуковский Олег Валерійович, канд. с.-г. наук, ст. наук. співробітник.

Email: zh_oleh2183@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-3351-9856>

Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна, канд. с.-г. наук, доцент, кафедра екології та природоохоронних технологій.

Email: org_vvm@ztnu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-3551-5085>

Цитування за ДСТУ: Краснов В. П., Жуковский О. В., Мельник-Шамрай В. В. Лісова радіоекологія в Україні – 40 років з часу аварії на ЧАЕС. Науковий вісник НЛТУ України. 2026, т. 36, № 2. С. 26–35.

Citation APA: Krasnov, V. P., Zhukovskiy, O. V., & Melnyk-Shamrai, V. V. (2026). Forest radioecology in Ukraine – 40 years after the Chernobyl Nuclear Power Plant accident. *Scientific Bulletin of UNFU*, 36(2), 26–35. <https://doi.org/10.36930/40360203>

у цій місцевості проживали або працювали, але й надходження радіонуклідів до їх організму з продуктами харчування (дикорослими та культурними).

Під час первинного аналізу лісових екосистем біля місць випробування атомної зброї (за межами руйнівної дії ударної хвилі) дослідники, з часом, спостерігали негативну дію іонізуючих випромінювань на компоненти лісових екосистем – загибель, пригнічення розвитку, зміни в репродукції тощо. Подібні результати отримали також науковці після здійснення важливих досліджень у Брукхейвенській національній лабораторії BNL (англ. *Brookhaven National Laboratory*) у Сполучених Штатах Америки у 60-х роках XX ст., у якій створено експериментальне поле з потужним джерелом гамма-випромінювання. Дослідники вивчали радіобіологічні ефекти рослин та екосистем під дією постійного опромінення. Відомі результати досліджень, які здійснив Джордж М. Вудвелл. Дослідник встановив [60, 61], що сосна веймутова (*Pinus rigida* Mill.) є надзвичайно чутливою до опромінення. Навіть низькі його дози (менше 5 Р·доба⁻¹) можуть призводити до загибелі значної частини дерев цього виду впродовж кількох років. Він також виявив, що стійкішими є листяні деревні породи. Узагальнюючи результати, дослідник також показав, що опромінення призводило до регресії (спрошення) структури рослинної спільноти, заміщення домінуючих видів на стійкіші завдяки відмиранню найменш стійких деревних порід. Це дало можливість йому зробити висновки, що радіаційний вплив спричиняє екологічну ретрогресію, схожу на зворотну сукцесію.

У цій самій лабораторії Сперроу зосереджувався на цитогенетичних механізмах радіочутливості рослин. Його дослідження дали змогу прогнозувати чутливість деревних порід (наприклад, сосни) на основі їхньої клітинної структури. Дослідник вперше довів [53], що існує пряма залежність між радіочутливістю рослини (її толерантністю до хронічного опромінення) та об'ємом ядра. На початку 70-х років XX ст. науковці лабораторії видали оглядовий матеріал [16], що підсумовує всі відомі на той час біохімічні, фізіологічні та морфологічні ефекти опромінення на рослини, зокрема і на деревні породи (морфологічні зміни, гальмування росту тощо). У 50-80-ті роки минулого століття науковці деяких країн провели дослідження щодо дії іонізуючого випромінювання на різні види деревних порід, встановлювали загальні схеми міграції деяких радіонуклідів у деяких типах лісових біогеоценозів, а також виявляли рівні вмісту радіоактивних ізотопів у деяких видах лісової флори. Дані дослідження були фрагментарними і проводились, головне, у штучно створених умовах і місцях випробування атомної зброї.

В Україні подібних досліджень не проводилось. Вони розпочалися після аварії на ЧАЕС і у перше десятиріччя їх здійснювали численні наукові установи. У цьому дослідженні здійснено узагальнення та групування за напрямками наявних результатів досліджень, проведених у лісових екосистемах України.

Об'єкт дослідження – становлення та розвиток лісової радіоекології в Україні з моменту аварії на Чорнобильській АЕС, що сприяє класифікації досліджень у лісових екосистемах і визначає ступінь пророблення їх можливих напрямів.

Предмет дослідження – наукові дослідження щодо міграції радіонуклідів у лісових екосистемах, а також

нормативні документи, що регламентують ведення лісового господарства на територіях, забруднених радіоактивними ізотопами.

Мета роботи – систематизувати та узагальнити матеріали наявних досліджень у лісових екосистемах, які зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, що дасть можливість сформулювати основні напрями подальших етапів дослідження та актуалізувати нормативні документи ведення лісового господарства і використання його продукції за умов радіоактивного забруднення.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- провести пошук і проаналізувати наукові публікації, що входять до сфери радіоекології лісових екосистем, що дасть змогу виявити основні спрямування проведених досліджень;
- систематизувати наукові роботи за напрямками досліджень, регіонами, роками, що дасть змогу зробити узагальнення щодо повноти їх проведення;
- здійснити оцінювання повноти наявних досліджень за спрямуванням, що дасть можливість сформулювати основні напрями подальших етапів дослідження, які потребують ґрунтового вивчення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У переважній більшості публікацій дослідників країн західної та північної частин Європи після аварії на ЧАЕС оцінено ризики для населення та довготермінову поведінку деяких (загалом ¹³⁷Cs) радіонуклідів у регіональних лісах. З цією метою вивчали рівні радіоактивного забруднення деяких дикорослих ягідних рослин, грибів, диких промислових тварин і деревини. У деяких публікаціях встановлено закономірності розподілу радіонуклідів у різних типах лісових ґрунтів. В основу їх досліджень покладено "Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident" [4].

Науковці Великої Британії [5, 7] у 1980-90-х роках минулого століття та через 30 років з часу аварії на ЧАЕС вивчали особливості радіоактивного забруднення території держави та встановили, що найбільш забрудненими радіонуклідами були лісові екосистеми. Вони ж виявили значний вміст ¹³⁷Cs у грибах і дикорослих ягідних рослинах. Дослідники також пояснювали, чому лісові екосистеми та органічні ґрунти сприяють довготривалому утриманню радіонуклідів. Схожі результати отримали науковці інших країн Європи – Фінляндській Республіці [51], Королівстві Швеції [10], Республіці Польщі [39], Федеративній Республіці Німеччини [54] та Австрійській Республіці [55]. Дослідники вивчали міграцію головних техногенних радіонуклідів – ¹³⁷Cs та значно менше ⁹⁰Sr у лісових ґрунтах різного типу та водного режиму, гранулометричного складу, у насадженнях різного породного складу тощо. Ці екологічні фактори впливають на інтенсивність міграції радіоактивних ізотопів трофічними ланцюгами, кінцевою ланкою яких є людина, а особливості ґрунтово-рослинного покриття цих регіонів зумовлюють значні рівні доз внутрішнього опромінення місцевого населення від споживання харчових продуктів лісу.

Після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р. підвищилась зацікавленість науковців проблемами, пов'язаними з лісовою радіоекологією. Ймовірно причиною активізації досліджень було те, що людство почало більше приділяти уваги екологічним питанням і радіоекології загалом, що до цього часу вони усвідомили, що лі-

сові екосистеми є стабілізаційним компонентом ландшафтів та біогеохімічним бар'єром на шляху міграції хімічних елементів, зокрема і радіонуклідів. Активізація досліджень зумовлена масштабами радіоактивного забруднення, значною лісистістю регіону з найвищими рівнями радіоактивного забруднення територій, використанням промисловістю та місцевим населенням різних компонентів лісових екосистем, а також зацікавленістю світової спільноти наслідками цієї ядерної катастрофи.

Наступний поштовх радіоекологічних досліджень у лісових екосистемах відбувся після аварії на АЕС "Фукусіма-1" в Японії. Відомо, що близько 67 % територій, забруднених внаслідок цієї аварії, вкрита лісами [56]. Науковці виявили у роботі [59] морфологічні зміни у ялиці японської під дією хронічного опромінення. Частота цих дефектів у зоні з високим рівнем радіоактивного забруднення була у 8-10 разів вищою, ніж у контрольній зоні з низьким фоном. Інші дослідники встановили [57] низхідну міграцію ^{137}Cs у лісах кедр японського та оцінили швидкість його кореневого поглинання цієї деревною породою [18], а також встановили [36] особливості переходу ^{137}Cs з лісової підстилки у мінеральну частину ґрунту.

Отже, науковці країн Європи, які зазнали впливу аварійних викидів на ЧАЕС, не проводили вивчення розподілу основних дозоутворювальних радіоізотопів у лісових екосистемах і не розробляли питання щодо ведення лісового господарства за умов радіоактивного забруднення, а за останні 20 років їх проводили у дуже обмежених масштабах. Водночас, в Україні здійснено чисельні, тривалі дослідження щодо міграції радіонуклідів у лісових біогеоценозах на лісотипологічній основі та порушено проблеми ведення лісового господарства у лісових масивах різних природних зон. Результати цього дослідження потребують узагальнення та зіставлення з новими вимогами, які ставляться перед радіоекологією лісових екосистем.

Матеріали та методи дослідження. Дослідження проведено з використанням системного підходу до наукового пізнання, який було організовано тематично, хронологічно та концептуально і складалося з етапів – планування, пошуку, систематизації та оцінювання. Відбирали видання та наявні літературні джерела, в яких висвітлювались результати дослідження провідних світових фахівців з радіоекології та лісової радіоекології, а також наукові публікації та монографії українських дослідників, в яких висвітлено основні аспекти лісової радіоекології після аварії на Чорнобильській атомній станції.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Потрібно зазначити, що до аварії на Чорнобильській АЕС у галузі лісового господарства України не існувало наукових підрозділів, які б займалися теоретичними або практичними питаннями лісової радіоекології. Тому системні дослідження в лісових екосистемах розпочалися не з перших днів після аварії на ЧАЕС, а значно пізніше: після створення у 1987 р. лабораторій радіоекології лісу на Поліській агролісомеліоративній дослідній станції (нині – Поліський філіал УкрНДІЛГА) та Старопетрівській лісовій дослідній станції (нині – державне підприємство "Клавдієвська лісова науково-дослідна станція"). Потрібно було ще декілька років для оснащення лабораторій приладами та підготовки і

залучення фахівців. У перші роки з часу аварії на ЧАЕС в системі Українського науково-дослідного інституту лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького фрагментарні дослідження здійснювали науковці, які займалися іншими науковими проблемами – селекцією, захистом лісу від хвороб та шкідників, ґрунтознавством, екологією лісу тощо. Також фрагментарні дослідження у лісових екосистемах з перших років після аварії дослідження проводили деякі інститути Національної академії наук України (Інститут ботаніки, Інститут зоології, Інститут гідробіології, Інститут фізіології), а з часом до них приєдналися фахівці деяких навчальних університетів. У 30-ти кілометровій зоні ЧАЕС у 1989 р. створено Науково-технічний центр, у якому була група дослідників, які вивчали міграцію радіонуклідів у лісових екосистемах.

Головним спрямуванням лісової радіоекології є вивчення особливостей надходження радіоактивних ізотопів до лісових систем, їх первинного розподілу та поступового перерозподілу між численними компонентами у часі. Треба зауважити, що досліджень щодо первинного затримання та перерозподілу радіонуклідів у лісових екосистемах в перші роки після їх надходження у довкілля в Україні не проводилось. Відомо, що первинний розподіл радіонуклідів визначає дозові навантаження на біоту та наступні радіобіологічні ефекти. Німецькі дослідники [6], які проводили дослідження після аварії на ЧАЕС у стиглих ялинових лісах, на луках і ріллі у південній Баварії, встановили, що на лісові екосистеми осіло на 20-30 % радіонуклідів більше, ніж на відкриті площі. Втім, дослідники застерігали, що ступінь затримання радіоактивних ізотопів залежить від численних факторів: погодних умов, періоду з часу аварії, оскільки це визначало форми надходження радіонуклідів, рельєфу місцевості, наявності значних за площею водойм, породного складу лісових насаджень, їх віку, пори року тощо.

У перші роки з часу аварії на ЧАЕС в Україні було здійснено невеликі дослідження [22] щодо особливостей радіоактивного забруднення узлісь. Виявлено, що у лісових масивах найбільші рівні вмісту радіонуклідів були у лісових насадженнях навітряних узлісь з боку джерела аварійних викидів у смузі 50 м (в середньому). Науковці стверджували, що лісові насадження значно зменшували кінетичну енергію повітряних потоків і це сприяло "сухому" гравітаційному осадженню радіоактивних частинок. Ще ефективніше на осадження аерозольних часток впливають лісові смуги та куртинні лісонасадження [34]. Згодом це підтвердили [1] науковці Чорнобильського державного науково-технічного центру міжнародних досліджень у 30-ти кілометровій зоні ЧАЕС за результатами значної кількості вимірювань потужності експозиційної дози гамма-випромінювання в різних компонентах лісових екосистем і на відкритих територіях (полях). Основна маса радіоактивних ізотопів, які надходили до лісових екосистем, осідала на поверхню листків, гілок і стовбурів дерев верхнього деревного ярусу. Частина з них опускалася, за наявності прогалін між деревами та менше під їх кронами, на підріст, підлісок, рослини надґрунтового покриву та ґрунт. Досліджень, які надавали б кількісне оцінювання інтенсивності переміщення радіонуклідів з верхнього деревного ярусу на нижні яруси та ґрунт, в Україні не проводилось.

У 90-ті роки ХХ ст. з'явилася достатньо багато публікацій щодо розподілу ^{137}Cs і значно менше ^{90}Sr – у ґрунтах лісових екосистем зони відчуження ЧАЕС. Така зацікавленість була природною, оскільки інтенсивність міграції або закріплення цих техногенних радіонуклідів у ґрунті визначали подальший напрямок та швидкість надходження до інших компонентів лісових екосистем, а надалі харчовими шляхами до людини. Дослідники наводили [2, 3, 19, 65] результати вивчення: розподілу (на той час) радіоактивних ізотопів автоморфних і гідроморфних ґрунтів у глибину; співвідношення їх форм (обмінна, розчинна, необмінна, паливні частинки); залежності їх перерозподілу від деяких агрохімічних характеристик ґрунтів; механізмів розпаду паливних частинок і перехід ^{137}Cs в обмінну форму. Наведені матеріали надавали уявлення про незначне заглиблення деяких радіонуклідів на той час за умов різного зволоження ґрунтів. Дослідники також прогнозували [3], що у лісових ґрунтах навіть через 20 років з часу аварії на ЧАЕС до 90 % запасу ^{137}Cs буде знаходитись у верхньому 5-сантиметровому шарі.

За межами 30-кілометрової зони ЧАЕС науковці Поліського філіалу УкрНДІЛГА вже близько 40 років проводять дослідження щодо встановлення закономірностей міграції ^{137}Cs у ґрунтах різних типів лісорослинних умов Житомирського Полісся, результати яких викладено у численних публікаціях протягом періоду спостережень. Дослідники [21] наводять динамічні у часі показники валового розподілу радіонуклідів у шарах лісової підстилки та мінеральної частини ґрунту у різних трофотопях та гігротопях. Загальна схема цієї динаміки властива для всіх лісорослинних умов – поступове переміщення ^{137}Cs з нерозкладеної частини лісової підстилки до розкладеної, до мінеральної частини ґрунту і заглиблення у ньому (таблиця).

Таблиця. Вертикальний розподіл сумарної активності ^{137}Cs у ґрунтах різних трофотопів (2000 р.) / Vertical distribution of total ^{137}Cs activity in soils of different trophic habitats (2000)

Шар, глибина, см	Вологі бори		Вологі субори		Вологі сугруди	
	Бк/500 см ²	%	Бк/500 см ²	%	Бк/500 см ²	%
Н ₀ сучасний	52	0,16	187	0,67	31	0,09
Н ₀ напів-розкладений	6490	20,57	2615	9,38	592	1,70
Н ₀ розкладений	15721	49,82	8303	29,79	11508	33,04
0-2	5936	18,81	6306	22,62	12918	37,09
2-4	1150	3,64	3997	14,34	4848	13,92
4-6	442	1,40	2517	9,03	2743	7,88
6-8	332	1,05	1655	5,94	1126	3,23
8-10	295	0,93	831	2,98	486	1,40
10-12	183	0,58	597	2,14	271	0,78
12-14	199	0,63	319	1,14	161	0,46
14-16	276	0,87	244	0,88	73	0,21
16-18	230	0,73	176	0,63	40	0,11
18-20	248	0,79	125	0,45	30	0,09

Потрібно зазначити, що швидкість цього процесу залежить від деяких факторів. Встановлено, що тривалість процесу переміщення радіонуклідів до мінеральної частини ґрунту була довшою у хвойних насадженнях (4-8 років) у співвідношенні з листяними (1-2 роки). Останнє пояснювалось швидкою мінералізацією листяного опаду. Оскільки із збільшенням трофності ґрунту у лісових насадженнях збільшується густо-

та листяних деревних порід у деревних ярусах, а також присутність чагарників, чагарничків і трав'яних рослин, то переміщення ^{137}Cs до мінеральної частини ґрунту відбулось швидше у багатших лісорослинних умовах.

Після початку переміщення радіонуклідів до гумусо-елювіального горизонту мінеральної частини ґрунту розпочалася його міграція до рослин різних ярусів лісових біоценозів і міцелію грибів. До останніх цей процес почав відбуватися ще з лісової підстилки, оскільки гриби беруть участь у її мінералізації. Лісову підстилку хвойних деревних порід розкладають загалом гриби. Процес міграції радіонуклідів до грибів вивчено ще недостатньо, але відомі дані сумісних досліджень українських і шведських дослідників [58], які стверджують, що більша частина ^{137}Cs у лісових ґрунтах сконцентрована саме у міцелію грибів.

Паралельно з надходженням радіонуклідів до біоти відбувалася їх міграція у глибші шари ґрунту. Цей процес також мав свої специфічні особливості у різних типах лісорослинних умов. Якщо з лісової підстилки ^{137}Cs переходив до мінеральної частини ґрунту швидше у багатших трофотопях, то міграція у глибину останньої відбувалася дещо швидше на бідних піщаних ґрунтах. Науковці пояснювали [25] це тим, що у ґрунті сугрудів у співвідношенні до борів є більше гумусу, мулистих та глинистих фракцій, більша насиченість колоїдами, це сприяє закріпленню радіонуклідів й уповільненню міграції у глибину. У середині 90-х років ХХ ст. більша частина сумарної активності радіонуклідів містилася у 10-сантиметровому шарі мінеральної частини ґрунту, то нині та ж сама частка міститься у 25-сантиметровому шарі [26]. Тривалі періодичні дослідження [9] щодо розподілу ^{137}Cs у ґрунтах проводили науковці Старопетрівської лісової дослідної станції у Поліссі та Лісостепу Київської області.

Науковці Поліського філіалу УкрНДІЛГА [46] провели досить широкі та складні дослідження щодо міграції ^{137}Cs в очісному шарі торфу та торфі оліготрофних, мезотрофних і евтрофних боліт, а також виявляли вміст радіонуклідів в поверхневій, імпрегнованій, торфовій та дренажній воді зазначених типів боліт (рис. 1).

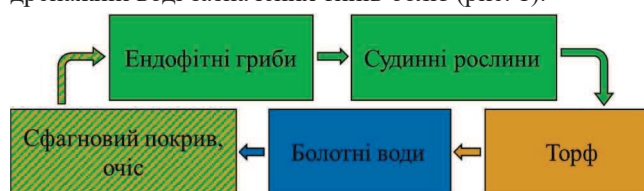


Рис. 1. Схема функціонування біогеохімічного циклу ^{137}Cs та інших елементів в екосистемах сфагнових боліт / Schematic representation of the biogeochemical cycle of ^{137}Cs and other elements in sphagnum bog ecosystems

Водночас, дослідники встановлювали питому активність ^{137}Cs в усіх компонентах лісових фітоценозів і грибах. Матеріали групували за ярусами: деревним, чагарниковим, трав'яно-чагарниковим, моховим, лишайниковим. За сприяння згаданих вище науковців подібні дослідження [12, 13] здійснили дослідники Рівненського природного заповідника. Науковці Поліського філіалу УкрНДІЛГА також досліджували особливості біохімії ^{137}Cs у сфагнових болотах [45, 48] та разом з дослідниками Інституту мікробіології і вірусології НАН України [35, 50] в екосистемах лісових боліт з'ясували значення ендоефітних грибів у мінеральному живленні рослин в цих умовах і транспортуванні ^{137}Cs з ґрунтового

субстрату до різних тканин та органів. У зразках сфагнових мохів, деревних порід, кущиків і трав'яних рослин дослідники виявили спільні види грибів-ендофітів. Вони ж отримали непрямі докази про визначальне значення останніх у транспортуванні мінеральних елементів, зокрема і ^{137}Cs , до рослин сфагнових боліт.

У різні періоди з часу надходження радіоактивних ізотопів до лісових екосистем у Житомирському Поліссі науковці досліджували [29] розподіл сумарної активності ^{137}Cs у компонентах лісових екосистем в різних типах лісорослинних умов. Вони надають достатньо повне уявлення про шляхи та інтенсивність міграції радіонуклідів у різні яруси рослинності на лісотипологічній основі (від сухих до мокрих гігротопів, від борів до сугрудів). У процесі дослідження виявилось: збереження більшої частини активності радіоактивного ізотопу у ґрунті та його більшого заглиблення в менш багатих лісорослинних умовах; інтенсивне його накопичення та закріплення у деревині деревних порід; продовження

інтенсивного надходження ^{137}Cs до рослин різних ярусів рослинності та грибів при загальному тренді – її зниженні з роками. Ці дослідження є фундаментальні у лісовій радіоекології. Окремі ланки цих досліджень науковці вивчали детальніше: міграція радіонуклідів до численних рослин трав'яно-чагарничкового ярусу у найпоширеніших у Поліссі України типах лісорослинних умов [47, 49], до основних видів деревних порід [38, 64] та багатьох видів грибів [14, 27, 63], розподіл активності ^{137}Cs за річними кільцями сосни звичайної [17, 33]. Багаторічні дослідження [20, 28] у вивченні шляхів та інтенсивності міграції радіонуклідів у лісових екосистемах дали змогу науковцям Поліського філіалу УкрНДІЛГА та Державного університету "Житомирська політехніка" побудувати концептуальну схему міграції ^{137}Cs в екосистемі соснового лісу у вологих суборах (рис. 2) та створити прогностичні моделі радіоактивного забруднення компонентів екосистеми і продукції лісового господарства на декілька десятиліть уперед.

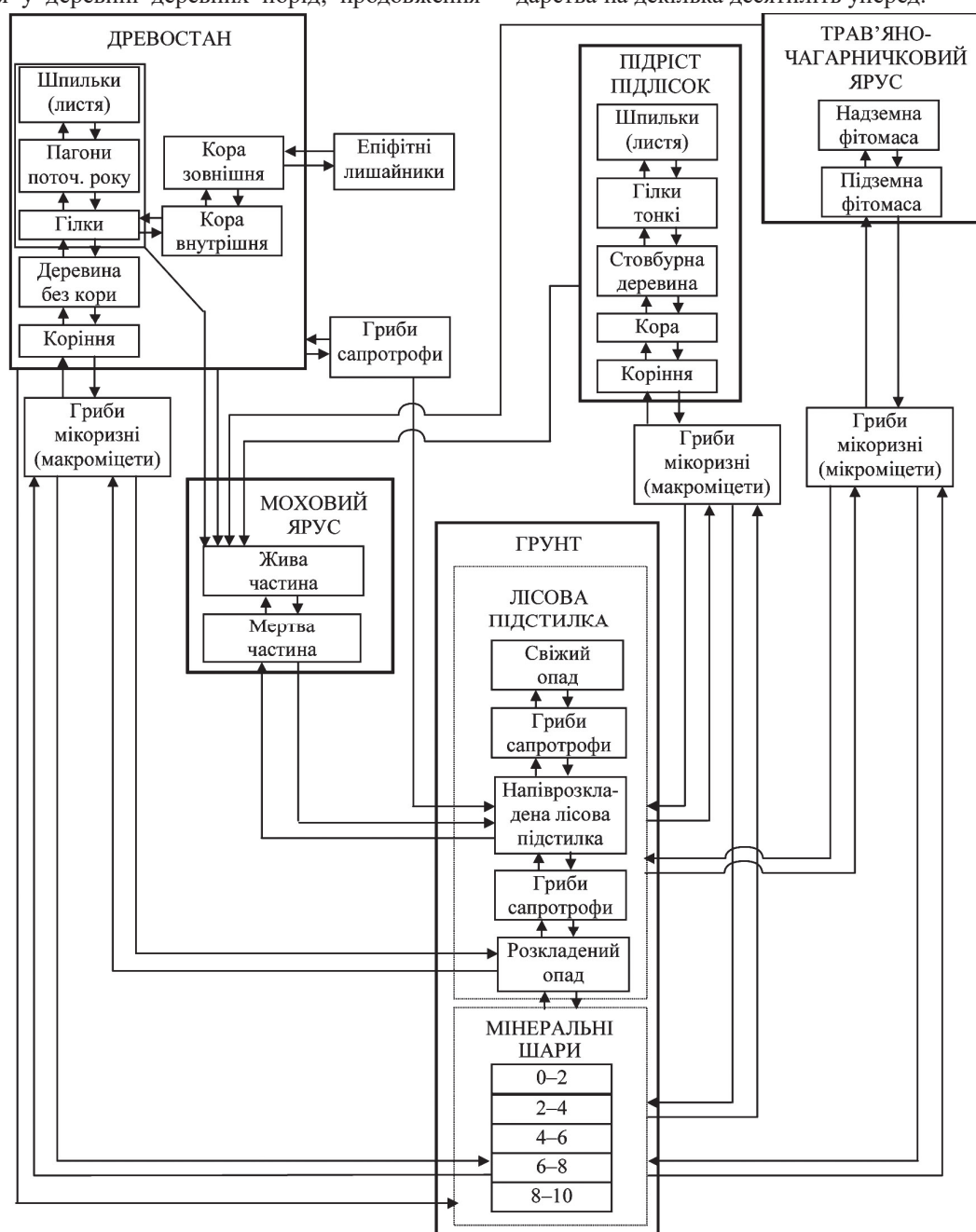


Рис. 2. Концептуальна схема міграції ^{137}Cs в екосистемі соснового лісу у типі лісу В₃ДС / Conceptual diagram of ^{137}Cs migration in the pine forest ecosystem in forest type В₃DS

Досить тривалий час у лісових масивах Житомирщини проводили дослідження [15, 23, 31, 32] щодо виявлення особливостей радіоактивного забруднення диких промислових тварин і птахів. Дослідники вивчали інтенсивність накопичення ^{137}Cs в органах козулі європейської (*Capreolus capreolus* (Linnaeus, 1758)), свині дикої (*Sus scrofa* (Linnaeus, 1758)), лося європейського (*Alces alces* (Linnaeus, 1758)) та качки звичайної (*Anas platyrhynchos* (Linnaeus, 1758)). Встановлено, що основні закономірності поглинання та розподілу радіонуклідів пов'язані з екологічними та біологічними особливостями тварин, зумовлені типом харчування і місцем в харчовому ланцюгу біогеоценозу, інтенсивністю обміну речовин, морфологією і хімічним складом окремих органів і тканин, способом життя та деякими іншими факторами. Детальніше простежено міграцію ^{137}Cs у трофічному ланцюгу "грунт → кормові рослини → козуля європейська" (рис. 3). Вивчено склад природних кормів у різні пори року й оцінено внесок різних видів у радіоактивне забруднення різних органів тварин та розподіл у них радіонуклідів.

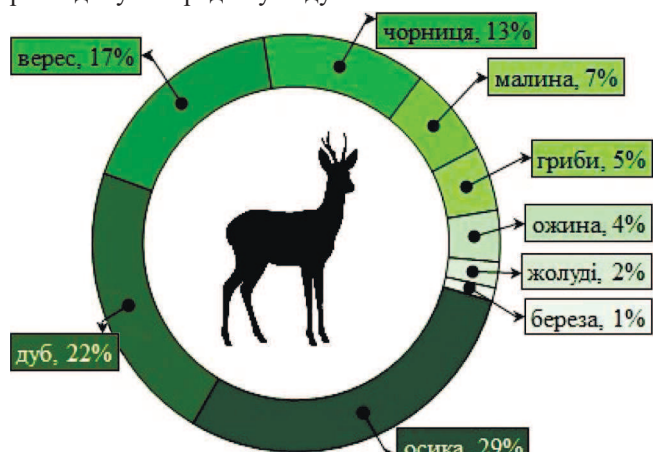


Рис. 3. Внесок кормів, які найбільше вживає козуля європейська, у радіоактивне забруднення осіннього раціону / Contribution of feed most commonly consumed by European roe deer to radioactive contamination of the autumn diet

Найбільші рівні радіоактивного забруднення територій загалом та лісових масивів безпосередньо були біля джерела аварійних викидів у 30-кілометровій зоні ЧАЕС. На деяких ділянках лісові насадження зазнали значного опромінення і загинули, але були значні площі, на яких насадження отримали досить різні дози, ефект від дії яких був різноманітний. Дослідники Київської науково-дослідної станції (нині ДП "Клавдієвська лісова науково-дослідна станція") тривалий час вивчали [40] вплив іонізуючого випромінювання на проходження мітозів і мейозів сосни звичайної. Разом з ними науковці Національного лісотехнічного університету [62] досліджували лісівничі та фізіологічні особливості функціонування насаджень сосни звичайної за різних рівнів радіоактивного забруднення територій.

З часом, після тривалого вивчення міграції радіонуклідів у лісових екосистемах, дослідники змогли узагальнити результати численних досліджень, які здійснили науковці в Україні, й обґрунтувати [24] концептуальні положення та методологію радіаційного моніторингу лісових екосистем. Ці розробки досить важливі для розуміння наукових завдань, які продовжують існувати, та актуалізації практичних рекомендацій з ведення лісового господарства.

У зв'язку зі зміною радіаційної ситуації у лісових масивах дослідники обґрунтували [30] методологію реабілітації лісів, забруднених радіоактивними ізотопами внаслідок аварії на ЧАЕС. Нагальна потреба створити такі нормативні документи була продиктована, передусім, істотною зміною радіаційної ситуації на територіях, забруднених радіонуклідами внаслідок природного розпаду радіоактивних ізотопів, а також їх перерозподілом між компонентами лісових екосистем які інтенсивно, використовувала людина.

Систематизація радіоекологічних досліджень у лісових екосистемах, проведених в Україні, дала змогу порівняти їх результати з основними вимогами, які ставляться перед сучасним радіоекологічним моніторингом. Можна зробити узагальнення, що радіаційний моніторинг проведено не у повному обсязі, потребує нових методичних підходів, значного фінансування та забезпечення сучасними приладами та обладнанням. Потрібно також розроблення нормативних документів щодо його проведення на різних рівнях.

Обговорення результатів дослідження. У 2009 р. засновано міжнародну асоціацію – Європейський радіоекологічний альянс (англ. *The Alliance*), яка мала на меті об'єднати провідні інституції для оцінювання впливу радіоактивних речовин на людину та довкілля. Основна мета такого об'єднання – координація досліджень у галузі радіоекології [11]. Члени асоціації розробили Стратегічний дослідницький план SRA (англ. *Solicitors Regulation Authority*), який передбачав плани досліджень до 2030 р., зокрема й у лісових екосистемах. Нині науковці констатують значне скорочення радіоекологічних досліджень, що пов'язано зі значним зменшенням фінансування. Вони ж пропонують перегляд Стратегічного дослідницького плану на основі систематизації наявних досягнень, удосконалення моделей моніторингу, а також збільшення фінансування для цього. Для покращення [37] радіоекологічного моніторингу науковці пропонують залучення громадян.

Міжнародна агенція з атомної енергії, яка діє у системі ООН, періодично оновлює нормативні документи [41], в яких пропонують нові підходи до радіаційного моніторингу, зокрема й у лісових екосистемах. Документ містить окремі рекомендації щодо відбору проб у лісових екосистемах (грунт, підстилка, гриби, ягоди, деревина), оскільки ліси є критичними "пастками" для радіонуклідів. У цьому самому документі описано методи дистанційного моніторингу великих заліснених територій за допомогою безпілотних літальних апаратів та оброблення даних супутникового зондування. Попри загальне схвалення цього документу науковцями, він зумовив серію критичних зауважень [42], серед яких складність та значна вартість радіоекологічного моніторингу. Загалом, науковці [11] рекомендують перехід країн на нові норми моніторингу довкілля та посилення вимог до оцінювання впливу опромінення на всі компоненти екосистем, як невід'ємної частини радіаційної безпеки.

Проведене обговорення результатів дослідження та їх систематизація, викладених у численних літературних джерелах, в яких висвітлено результати вивчення міграції радіоактивних ізотопів у лісових екосистемах, накопичення радіонуклідів у їх компонентах; дію іонізуючих випромінювань на лісові насадження; регламентування ведення лісового господарства і використання його продукції за умов радіоактивного забруднення.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – отримала подальший розвиток методика узагальнення результатів наявних досліджень, проведених у лісових екосистемах з часу аварії на ЧАЕС, яка, на відміну від наявних методик, враховує закономірності первинного перерозподілу та міграції радіоактивних ізотопів у лісових екосистемах в різних типах лісорослинних умов, а також дію іонізуючих випромінювань на лісові насадження, що дає можливість регламентувати ведення лісового господарства і використання його продукції за умов радіоактивного забруднення.

Практична значущість результатів дослідження – можна використати для регламентування особливостей ведення лісового господарства та використання продукції лісового господарства за умов радіоактивного забруднення лісів, для планування та організації радіоекологічних досліджень у лісових екосистемах, що зазнали радіоактивного забруднення внаслідок цієї катастрофи, а також під час встановлення нормативних документів, які потребують перегляду через 40 років з часу надходження радіонуклідів у лісові екосистеми.

Висновки / Conclusions

Систематизовано та узагальнено матеріали наявних досліджень у лісових екосистемах, які зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС, що дало можливість сформулювати основні напрями подальших етапів дослідження й актуалізувати нормативні документи ведення лісового господарства і використання його продукції за умов радіоактивного забруднення. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Встановлено, що проведені протягом 40 років з часу аварії на Чорнобильській АЕС дослідження дали змогу загалом сформулювати загальні уявлення про шляхи надходження, первинного перерозподілу та подальшої міграції радіонуклідів у лісових екосистемах Полісся України та надати кількісне оцінювання виявленим процесам та закономірностям на лісотипологічній основі у часі. Дослідники виявили важливе значення лісової підстилки, мохового покриву та міцелію грибів, які стають своєрідним біологічним бар'єром у перерозподілі радіоактивних ізотопів. Теоретичні узагальнення дали змогу обґрунтувати лісову радіоекологію як спрямування у загальній радіоекології та лісознавстві, а практичні розробки та рекомендації внесли значні корективи у прикладному лісівництві у вигляді численних доповнень у практику ведення лісового господарства на територіях, забруднених радіоактивними ізотопами.
2. Виявлено, що існують певні напрями досліджень, які залишаються недостатньо вивченими на біоценотичному та геобіоценотичному рівнях. Водночас, вони дали б змогу ефективніше розробляти та використовувати моделі міграції радіонуклідів у різноманітних типах лісорослинних умов, які давали б можливість не тільки надавати повне (візуальне та кількісне) уявлення про ці процеси, але й прогнозувати дозові навантаження (зовнішнього та внутрішнього опромінення) на живі організми та людину. Потребує подальшого розвитку концепція радіоекологічності екосистем загалом і лісових безпосередньо, яку запропонували українські радіоекологи.
3. Підтверджено, що у віддалений від часу аварії період залишаються актуальними моніторингові дослідження, спрямовані на виявлення особливостей міграції радіонуклідів у різноманітних лісових ґрунтах різних при-

родних зон, а також у системах – "ґрунт → конкретний вид рослин" та "ґрунт → рослини → дикі тварини". Потрібно зазначити, що подібні дослідження в Україні в останнє десятиліття або зменшились, або припинилися. Вони вкрай необхідні не тільки для розуміння подальшої міграції радіоактивних ізотопів у лісових екосистемах, але й з аналізу регламентування використання частини їх компонентів людиною (дикорослі гриби, ягідні та лікарські рослини, дикі мисливські тварини).

4. Представлено, що у післяаварійний на ЧАЕС період в Україні були розроблені і використовувались в практиці ведення лісового господарства численні нормативні документи, які повністю регламентували лісогосподарську діяльність і використання продукції лісового господарства на територіях, забруднених радіонуклідами. Деякі з них переставали бути актуальними, оскільки розроблялись для конкретних завдань у певний період часу, а частина з них перероблялась та доповнювалась з урахуванням нових даних про міграцію радіонуклідів у лісових екосистемах, накопичення їх у тих чи інших їх компонентах і радіаційною ситуацією у лісових масивах взагалі. Тому потребують актуалізації "Рекомендації з ведення лісового господарства на територіях, забруднених внаслідок аварії на ЧАЕС", у яких передусім потрібно переглянути їх структуру, методологію зонування лісів та внести доповнення з урахуванням можливих змін через військові дії на частині території. Потребують також перегляду "Методичні рекомендації з реабілітації лісів на територіях, забруднених радіонуклідами внаслідок аварії на ЧАЕС", які враховували б сучасні тенденції у радіоактивному забрудненні лісів.

References

1. Arkhipov, N. P., Kuchma, N. D., Askbrant, S., Pasternak, P. S., & Musica, V. V. (1994). Acute and long-term effects of irradiation on pine (*Pinus silvestris*) stands post-Chernobyl. *Science of The Total Environment*, 157, 383–386. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90601-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90601-7)
2. Arkhypov, A. M., Arkhypov, M. P., Horodetskyi, D. V., Dolin, V. V., Ivanov, Yu. O., Lohinova, L. S., Meleshyn, A. Yu., & Ozorov, A. H. (1996). Soil condition of the exclusion zone. *Bulletin of the ecological condition of the exclusion zone*, 1(6), 17–21. [In Ukrainian]. URL: [https://ecogisstorage.blob.core.windows.net/ecogis-prod-materials/23/Biuletyn%20№1\(6\).%201996.pdf](https://ecogisstorage.blob.core.windows.net/ecogis-prod-materials/23/Biuletyn%20№1(6).%201996.pdf)
3. Arkhypov, A. M., Meleshyn, A. Yu., Myeshalkin, H. S., Paskevych, V. A., & Arkhypov, M. P. (1997). Quantitative assessment of vertical migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils of the exclusion zone. Collection of abstracts of the scientific and practical conference "Science. Chernobyl-96" (February 11–12, 1997, Kyiv). Kyiv: Ukrainian Radiological Training Center, 69. [In Ukrainian]. URL: <https://inis.iaea.org/records/ne8aa-kza34/files/31014469.pdf>
4. Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident. (1998). Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 108 p. URL: <https://komekolog.rada.gov.ua/uploads/documents/36574.pdf>
5. Barnett, C. L., Beresford, N. A., Self, P. L., Howard, B. J., Frankland, J. C., Fulker, M. J., Dodd, B. A., & Marriott, J. V. (1999). Radiocaesium activity concentrations in the fruit-bodies of macrofungi in Great Britain and an assessment of dietary intake habits. *Science of The Total Environment*, 231, 67–83. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00085-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00085-6)
6. Bunzl, K., & Kracke, W. (1988). Cumulative deposition of ^{137}Cs , ^{238}Ru , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am from global fallout in soils from forest, grassland and arable land in Bavaria (FRG). *Journal of Environmental Radioactivity*, 8(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(88\)90010-0](https://doi.org/10.1016/0265-931X(88)90010-0)
7. Chaplow, J. S., Beresford, N. A., & Barnett, C. L. (2015). Post Chernobyl surveys of radiocaesium in soil, vegetation, wildlife and fungi in Great Britain. *Earth System Science Data*, 7, 215–221. <https://doi.org/10.5194/essd-7-215-2015>

8. Clarke, R., & Valentin, J. (2005). A history of the international commission on radiological protection. *Health Physics*, 88(6), 717–732. <https://doi.org/10.1097/01.hp.0000154049.41251.1e>
9. Davidov, M., Protas, T., & Savuschik, M. (2014). Radionuclides accumulation in the basic components of forests ecosystem in Kiev Polissya and Lisostep forest. *Nuclear Power and the Environment*, 2(4), 25–31. [In Ukrainian]. URL: https://npe.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/02/4_2014.pdf
10. Fawaris, B. H., & Johanson, K. J. (1994). Radiocesium in soil and plants in a forest in central Sweden. *Science of The Total Environment*, 157, 133–138. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90572-X](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90572-X)
11. Gilbin, R., Arnold, T., Beresford, N. A., Berthomieu, C., Brown, J. E., de With, G., Horemans, N., Madruga, M. J., Masson, O., Merroun, M., Michalik, B., Muikku, M., O'Toole, S., Popic, J. M., Nogueira, P., Real, A., Sachs, S., Salbu, B., Stark, K., Steiner, M., Sweeck, L., Vandenhove, H., Vidal, M., & Batlle, J. V. (2021). An updated strategic research agenda for the integration of radioecology in the European radiation protection research. *Journal of Environmental Radioactivity*, 237, article ID 106697. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106697>
12. Golovko, O. V. (2012). Distribution of the gross stock of ^{137}Cs in mezotrophic forest-bog ecosystems of Western Polissya of Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*, 22(4), 96–101. [In Ukrainian]. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2012/22_4/index.htm
13. Golovko, O. V. (2012). Vertical distribution of ^{137}Cs in peat-bog soils of meso- and oligotrophic forest-bog ecosystems of Western Polissya, Ukraine. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 171(1), 49–56. [In Ukrainian]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnuu_lis_2012_171%281%29_10
14. Grodzynska, G., Nebesnyi, V., & Teslenko, I. (2023). Radioactive contamination of wild mushrooms in Chernihiv Polesie. *Biota. Human. Technology*, 2, 55–72. <https://doi.org/10.58407/bht.2.23.5>
15. Gulyk, I. T., & Krasnov, V. P. (2002). Ways to reduce ^{137}Cs levels in meat products of wild even-toed ungulates (wild boar, moose, roe deer). *Forestry and Forest Melioration*, 102, 46–52. [In Ukrainian]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/401679505>
16. Gunckel, J. K., & Sparrow, A. H. (1961). Ionizing radiations: biochemical, physiological and morphological aspects of their effects on plants. *Encyclopedia of Plant Physiology*, 16, 555–611. URL: <https://www.osti.gov/biblio/4446816>
17. Holiaka, D., Yoschenko, V., Cherniaiev, O. R., Moskaliuk, A., Lesnik, O., Levchuk, S., Holiaka, M., Gumenuk, V., Kovbasa, Y., Borsuk, O., Holik, V., Nanba, K., & Kashparov, V. (2023). Variability of activity concentrations and radial distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr in trunk wood of Scots pine and Silver birch. *Journal of Environmental Radioactivity*, 263, article ID 107186. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107186>
18. Imamura, N., Watanabe, M., & Manaka, T. (2021). Estimation of the rate of ^{137}Cs root uptake into stemwood of Japanese cedar using an isotopic approach. *Science of the Total Environment*, 755(2), article ID 142478. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142478>
19. Ivanov, Yu. O., Kashparov, V. O., Prister, B. S., Khomutinin, Yu. V., Levchuk, S. Ye., Protsak, V. P., & Zvarych, S. I. (1997). The influence of vertical migration in soils and physicochemical forms of radionuclide deposition on bioavailability. Collection of abstracts of the scientific and practical conference "Science. Chernobyl-96" (February 11–12, 1997, Kyiv). Kyiv: Ukrainian Radiological Training Center, 43. [In Ukrainian]. URL: <https://inis.iaea.org/records/ne8aa-kza34/files/31014469.pdf>
20. Kovalchuk, A. M., Levitsky, V. G., Samolyuk, I. I., Yanchuk, V. M., & Orlov, A. A. (2005). The investigation of the adequateness of the mathematical model of ^{137}Cs migration in forest ecosystems of Ukrainian Polissya. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 6(2), 142–150. <https://doi.org/10.15407/jnpae2005.02.142>
21. Krasnov, V. P. (1998). Radioecology of forests of Polesye of Ukraine. – Zhytomyr: Volyn, 112 p. [In Ukrainian]. URL: <https://polysskiy-branch.com.ua/dijalnist/monografiji.html>
22. Krasnov, V. P. (2016). Radioecological investigations in forest ecosystems of Ukraine. *Proceedings of the Forestry Academy of sciences of Ukraine*, 14, 210–216. <https://doi.org/10.15421/411629>
23. Krasnov, V. P., & Gulyk, I. T. (2002). Peculiarities of feathered game ^{137}Cs contamination in Central Polissya of Ukraine (15 years after Chernobyl accident). *Forestry and Forest Melioration*, 101, 30–35. [In Ukrainian]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/401639278>
24. Krasnov, V. P., & Orlov, O. O. (2002). Radiation monitoring of forest ecosystems: conceptual provisions. *Forestry and Forest Melioration*, 102, 10–19. [In Ukrainian]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/401675471>
25. Krasnov, V. P., Kurbet, T. V., Shelest, Z. M., & Boiko, O. L. (2016). ^{137}Cs redistribution in time in wet bory and sugrudy soils in Forests of Ukrainian Polissya. *Nuclear physics and atomic energy*, 17(1), 63–68. <https://doi.org/10.15407/jnpae2016.01.063>
26. Krasnov, V. P., Kurbet, T. V., Shelest, Z. M., & Boiko, O. L. (2015). ^{137}Cs distribution in sod-podzol forest soil of Ukrainian Polissya. *Nuclear physics and atomic energy*, 16(3), 247–253. <https://doi.org/10.15407/jnpae2015.03.247>
27. Krasnov, V. P., Orlov, O. O., & Kurbet, T. V. (2006). Radioecology of Edible Macromycetes. Zhytomyr: Volyn, 220 p. URL: <https://polysskiy-branch.com.ua/dijalnist/monografiji.html>
28. Krasnov, V. P., Orlov, O. O., & Landin, V. P. (2004). To the possibility of rehabilitation of forest contaminated by radionuclides. *Problems of ecology of forests and forest use on Polissya of Ukraine*, 4(10), 7–11. [In Ukrainian]. <https://www.researchgate.net/publication/402537173>
29. Krasnov, V. P., Orlov, O. O., Buzun, V. A., Landin, V. P., & Shelest, Z. M. (2007). Applied radioecology of forest. Zhytomyr: Polissya, 680 p. URL: <https://polysskiy-branch.com.ua/dijalnist/monografiji.html>
30. Krasnov, V. P., Orlov, O. O., Vedmid, M. M., & Landin, V. P. (2006). Methodical recommendations on rehabilitation of forests in territories contaminated with radionuclides due to the Chernobyl accident. Kyiv: Volyn, 20 p. [In Ukrainian]. URL: <https://polysskiy-branch.com.ua/dijalnist/vikhidni-dokumenty.html>
31. Krasnov, V. P., Shelest, Z. M., & Orlov, O. O. (1997). Some features of the accumulation of cesium-137 in the body of a roe deer. Collection of abstracts of the scientific and practical conference "Science. Chernobyl-96" (February 11–12, 1997, Kyiv). Kyiv: Ukrainian Radiological Training Center, 31. [In Ukrainian]. URL: <https://inis.iaea.org/records/ne8aa-kza34/files/31014469.pdf>
32. Krasnov, V. P., Shelest, Z. M., Orlov, O. O., Kaletnyk, M. M., Irkliencko, S. P., & Turko, V. M. (1998). Radioecology of European roe deer in Central Polissya. Zhytomyr: Volyn, 128 p. [In Ukrainian]. URL: <https://polysskiy-branch.com.ua/dijalnist/monografiji.html>
33. Krasnov, V. P., Zhukovskiy, O. V., & Orlov, O. O. (2020). Improvement of the sampling method for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood used to evaluate specific activity of ^{137}Cs . *Forestry and Forest Melioration*, 136, 126–133. <https://doi.org/10.33220/1026-3365.136.2020.126>
34. Kuchma, M. D., Arkhipov, M. P., Bidna, S. M., & Tereshchenko, O. N. (1997). The radioecological and forestry situation in the forests of the exclusion zone. Collection of abstracts of the scientific and practical conference "Science. Chernobyl-96" (February 11–12, 1997, Kyiv). Kyiv: Ukrainian Radiological Training Center, 53–54. [In Ukrainian]. URL: <https://inis.iaea.org/records/ne8aa-kza34/files/31014469.pdf>
35. Kurchenko, I. M., Sokolova, O. V., Zhdanova, N. M., & Orlov, O. O. (2005). Some enzymes activity of endophytic fungi from vascular plants of Ukrainian Polissya sphagnum peat bogs. *Odesa National University Herald. Biology*, 10(7), 255–261. [In Ukrainian]. URL: http://liber.onu.edu.ua/pdf/bio2005_10_7.pdf
36. Manaka, T., Komatsu, M., Sakashita, W., Imamura, N., Hashimoto, S., Hirai, K., Miura, S., Kaneko, S., Sakata, T., & Shinomiya, Y. (2022). Ten-year trends in vertical distribution of radiocesium in Fukushima forest soils, Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 251–252, article ID 106967. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106967>
37. Martell, M., Perko, T., Tomkiv, Y., Long, S., Dowdall, A., & Kennens, J. (2021). Evaluation of citizen science contributions to ra-

- don research. *Journal of Environmental Radioactivity*, 237, article ID 106685. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106685>
38. Melnyk-Shamrai, V., Orlov, O., Zhukovskyi, O., Kurbet, T., Krasnov, V., Ivaniuk, R., & Veselskyi, O. (2024). Modern radioactive contamination of tissues and organs of the common oak in the wet sugrud forests of Zhytomyr Polissia. *Environmental Sciences*, 5(56), 144–152. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.22>
 39. Mietelski, J. W., Jasińska, M., Kubica, B., Kozak, K., & Mac-harski, P. (1994). Radioactive contamination of Polish mushrooms. *Science of The Total Environment*, 157, 217–226. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(94\)90582-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(94)90582-7)
 40. Mitrochenko, V. V., Shlonchak, G. A., & Shlonchak, G. V. (1997). The genetic monitoring of pine stands in the area contaminated by radiation following the Chernobyl accident. Collection of abstracts of the scientific and practical conference "Science. Chernobyl-96" (February 11–12, 1997, Kyiv). Kyiv: Ukrainian Radiological Training Center, 102–103. [In Ukrainian]. URL: <https://inis.iaea.org/records/ne8aa-kza34/files/31014469.pdf>
 41. Monitoring for Protection of the Public and the Environment. (2025). International Atomic Energy Agency Safety Standards Series No. GSG-19. Vienna: IAEA, 98 p. <https://doi.org/10.61092/iaea.i7sy-xqdl>
 42. Nuclear Safety Review 2025. (2025). General Conference information documents of International Atomic Energy Agency. GC(69)/INF/2. Vienna: IAEA. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc69-inf2_1.pdf
 43. Odum, E. P. (1956). Consideration of the total environment in power reactor waste disposal. Proceedings of the international conference on the peaceful uses of atomic energy, vol. 13, Legal, administrative, health and safety aspects of large-scale use of nuclear energy (August 8–20, 1955, Geneva). New York: United Nations, 350–353. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/3905250?ln=en&v=pdf>
 44. Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2005). Fundamentals of Ecology. 5th Edition. Belmont: Thomson Brooks/Cole, 598 p. URL: https://archive.org/details/fundamentalsfec0000odum_y8v5/page/n7/mode/2up
 45. Orlov, O. O. (2006). The main regularities of ^{137}Cs distribution in the ecosystems of highly irrigated oligo-mezotrophic swamps of Western Polissya of Ukraine. *Radioecology of forests and forestry of Polissya of Ukraine*, 6(12), 28–41. [In Ukrainian]. URL: https://polysskiy-branch.com.ua/fileadmin/user_upload_polysskiy/files/2006.pdf
 46. Orlov, O. O., & Dolin, V. V. (2010). Biogeochemistry of cesium-137 in forest-bog ecosystems of Ukrainian Polissya. Kyiv: Naukova Dumka, 198 p. [In Ukrainian]. URL: <https://polysskiy-branch.com.ua/dijalnist/monografiji.html>
 47. Orlov, O. O., & Korotkova, O. Z. (2000). Peculiarities of seasonal dynamics of ^{137}Cs accumulation by phytomass of Bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) and Cowberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.). *Scientific Bulletin of UNFU*, 10(2), 34–43. [In Ukrainian]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/288906113>
 48. Orlov, O. O., & Krasnov, V. P. (2002). Quantitative phytoindication of soil parameters and ^{137}Cs availability for plant root nutrition in forest sphagnum bog ecosystems of Polissya, Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*, 12(2), 47–55. [In Ukrainian]. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2002/12_2/11.pdf
 49. Orlov, O. O., Getmanczuk, A. I., & Krasnov, V. P. (2005). Accumulation of ^{137}Cs by the main medicinal plants of forests in different types of forest habitats of Ukrainian Polissya. *Problems of ecology of forests and forest use on Polissya of Ukraine*, 5(11), 33–48. [In Ukrainian]. URL: <https://www.researchgate.net/publication/401636112>
 50. Orlov, O., Zhdanova, N., Kurchenko, I., & Sokolova, E. (2004). Ecological role of endophytic fungi in nutrition and uptake of radionuclides by berry plants of the *Ericaceae* family. *Botanica*, 10(3), 217–222. <https://botanicalithuanica.gamtc.lt/en/issue/42/vol-10-3-2004>
 51. Rantavaara, A. H. (1990). Transfer of radiocaesium through natural ecosystems to foodstuffs of terrestrial origin in Finland. In: Transfer of radionuclides in natural and semi-natural environments. Eds. G. Desmet, P. Nassimbeni, M. Belli. London-New York: Elsevier Applied Science, 202–209. URL: <https://inis.iaea.org/records/p8td2-zex11>
 52. Sources and effects of ionizing radiation. (2000). Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. New York: United Nations, I, 134 p. URL: https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf
 53. Sparrow, A. H., & Miksche, J. P. (1961). Correlation of Nuclear Volume and DNA Content with Higher Plant Tolerance to Chronic Radiation. *Science*, 134(3474), 282–283. <https://doi.org/10.1126/science.134.3475.321>
 54. Strand, P., Howard, B., & Averin, V. (1996). Transfer of radionuclides to animals, their comparative importance under different agricultural ecosystems and appropriate countermeasures. Experimental collaboration project No. 9, Final Report. Luxembourg, European Commission, 249 p. URL: <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/501756>
 55. Strebl, F., Gerzabek, M. H., Bossew, P., & Kienzl, K. (1999). Distribution of radiocaesium in an Austrian forest stand. *Science of The Total Environment*, 226(1), 75–83. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)90051-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)90051-1)
 56. Takahashi, J., Hihara, D., Sasaki, T., & Onda, Y. (2022). Evaluation of contribution rate of the infiltrated water collected using zero-tension lysimeter to the downward migration of ^{137}Cs derived from the FDNPP accident in a cedar forest soil. *Science of The Total Environment*, 816, article ID 151983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151983>
 57. Takahashi, J., Iguchi, S., Sasaki, T., & Onda, Yu. (2024). Downward migration of ^{137}Cs promotes self-cleaning of forest ecosystem by reducing root uptake of Japanese cedar in Fukushima. *Science of The Total Environment*, 945, article ID 174010. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174010>
 58. Vinichuk, M. M. (2014). Uptake of radiocesium by macromycetes in bog, pine swamp and forest. *Bulletin of Zaporizhzhia National University. Biological sciences*, 1, 155–163. [In Ukrainian]. URL: <https://web.znu.edu.ua/herald/issues/2014/2014-bio-1.pdf>
 59. Watanabe, Y., Ichikawa, S., Kubota, M., Hoshino, J., Kubota, Y., Maruyama, K., Fuma, S., Kawaguchi, I., Yoschenko, V., & Yoshida, S. (2015). Morphological defects in native Japanese fir trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Scientific Reports*, 1, article ID 13232. <https://doi.org/10.1038/srep13232>
 60. Woodwell, G. M. (1962). Effects of ionizing radiation on terrestrial ecosystems. *Science*, 138(3540), 572–577. <https://doi.org/10.1126/science.138.3540.572>
 61. Woodwell, G. M., & Whittaker, R. H. (1998). Effects of chronic gamma irradiation on plant communities. *The Quarterly Review of Biology*, 43, 42–55. URL: <https://www.jstor.org/stable/2818703>
 62. Zaika, V. K. (2005). Formation of *Pinus sylvestris* L. plantings in the radiation polluted territories and forest-regenerative processes in them. *Scientific Bulletin of UNFU*, 15(5), 13–18. [In Ukrainian]. URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2005/15_5/13_Zajika_15_5.pdf
 63. Zarubina, N. E., Burdo, O. S., Ponomarenko, L. P., & Shatrova, O. V. (2021). Two stages in the accumulation of ^{137}Cs by mushroom *Suillus luteus* after the Chernobyl accident. *Nuclear physics and atomic energy*, 22(3), 294–299. <https://doi.org/10.15407/jnpae2021.03.294>
 64. Zhukovskyi, O. V., Krasnov, V. P., Patseva, I. G., & Ivanyuk, I. D. (2025). Contemporary patterns of radioactive contamination in black alder across different forest site conditions in the Polissia region of Ukraine. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 26(3), 242–248. <https://doi.org/10.15407/jnpae2025.03.242>
 65. Zibitsev, S. V., & Zibitseva, O. V. (1999). Peculiarities of the ^{137}Cs and ^{90}Sr distribution in forest stands in mail forest sites of Chernobyl exclusion zone. *Problems of ecology of forests and forest use on Polissya of Ukraine*, 6, 39–50. [In Ukrainian]. URL: https://polysskiy-branch.com.ua/fileadmin/user_upload_polysskiy/files/ST5_1999_6_39-50.pdf

FOREST RADIOECOLOGY IN UKRAINE – 40 YEARS AFTER THE CHORNOBYL NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENT

The paper presents a comprehensive review and synthesis of national and international literature sources addressing the results of radioecological studies conducted in forest ecosystems both prior to the Chernobyl Nuclear Power Plant accident and in regions and countries affected by radioactive contamination during the first 10-15 years following the disaster. It is shown that the main research efforts were focused on investigating the effects of ionizing radiation on various tree species, the vertical and horizontal migration of radionuclides in forest soils, their accumulation in different components of forest ecosystems, and the assessment of the contribution of dose-forming radioisotopes to internal radiation exposure of the population. Key scientific publications of Ukrainian researchers from various scientific institutions involved in radioecological studies of contaminated forest ecosystems are analyzed. It has been established that the redistribution of ^{137}Cs within soil profiles was studied most thoroughly in the dominant forest site types of the Ukrainian Polissia, whereas significantly fewer similar studies were conducted in the forest-steppe zone of the country and, in both natural zones, with respect to ^{90}Sr . It was revealed that the temporal dynamics of ^{137}Cs distribution in certain components of forest ecosystems have been investigated rather fragmentarily, which limits the ability to comprehensively assess long-term radioecological processes. The analysis indicates that the migration of ^{137}Cs within the trophic system "soil → forage plants → internal organs of the European roe deer" has been studied in sufficient detail, as well as the characteristics and temporal dynamics of radioactive contamination of wild berry plants, medicinal herbs, and edible mushrooms, which are important contributors to internal radiation exposure. The necessity of updating and improving regulatory and methodological documents governing forest management practices in radionuclide-contaminated areas, taking into account current scientific knowledge, is emphasized.

Keywords: radioactive contamination; forest ecosystems; radionuclides; forest rehabilitation; radioecological studies.