

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ГОЛЯКА ДМИТРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК [630*907.1;630*:504.06:539.16, 630*2/.5:577.34]:528.8

ПРОСТОРОВЕ І ТЕМПОРАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ РАДІОЕКОЛОГІЧНИХ
ПОКАЗНИКІВ ЛІСІВ, ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ВНАСЛІДОК
ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АВАРІЇ

03.00.01 «Радіобіологія»

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора біологічних наук

Київ – 2026

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді за сукупністю наукових публікацій

Робота виконана в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України

Опоненти: доктор сільськогосподарських наук, професор
РОМАНЧУК Людмила Донатівна,
Державний університет «Житомирська політехніка»,
професор кафедри екології, лісівництва та сталого
природокористування

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
ТАЛЕРКО Микола Миколайович,
Інститут проблем безпеки атомних електростанцій
Національної академії наук України,
завідувач відділу радіаційної екології

доктор біологічних наук, професор
ЧОБОТЬКО Григорій Михайлович,
Інститут агроєкології і природокористування
Національної аграрної академії наук України,
головний науковий співробітник лабораторії радіоекології
аграрних і лісових екосистем відділу радіоекології і
дистанційного зондування ландшафтів

Захист відбудеться «23» жовтня 2026 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні докторської спеціалізованої вченої ради Д 26.004.08 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ–41, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ–41, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Вчений секретар докторської
спеціалізованої вченої ради

Володимир ІЛЛЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У перше десятиліття після Чорнобильської катастрофи основна увага в процесі вивчення накопичення та розподілу радіонуклідів була зосереджена на сільськогосподарських землях, оскільки саме продукція аграрного виробництва є основним джерелом надходження радіоізоотопів в організм людей, які мешкають на забруднених територіях. З часом з'ясувалося, що ступінь радіоактивного забруднення продукції сільського господарства за декілька десятиліть значно знизився, тоді як компонентів лісових фітоценозів зменшилося лише у 2–3 рази. Тому наразі українськими вченими і дослідниками з НУБіП України, державних установ Державного агентства з управління зоною відчуження, НАН України та Національної академії аграрних наук України спільно із вченими з інших країн виконано та продовжує виконуватися низка бюджетних науково-дослідних тем і міжнародних проєктів щодо оцінки впливу метеорологічних і радіологічних чинників на динаміку радіального приросту дерев, прогнозування продуктивності компонентів біомаси, параметризації моделей біогеохімічного кругообігу ^{137}Cs і ^{90}Sr для забруднених лісових територій, ідентифікації біологічних ефектів від хронічного впливу іонізуючих випромінювань на референтні деревні види. Ключовим у цьому напрямі тривалий проміжок часу був спільний японсько-український науково-дослідний проєкт SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable), розпочатий у другій половині 2017 року, в якому брали участь дві провідні наукові установи в галузі радіоекології Японії (університети міст Фукусіма і Цукуба) та 12 партнерів з України. До проєкту також залучалися й інші зацікавлені сторони: представники радіоекологічних шкіл Великобританії, Франції та Норвегії. Зазначені проєкти є системним продовженням попередніх досліджень у галузі лісової радіобіології та радіоекології, які дозволили розкрити питання міграції і перерозподілу радіонуклідів, виявити їх основні потоки й депо та надалі дали змогу здійснити прогнозування радіоізоотопів у компонентах лісу. Однак з часом постала потреба практичної імплементації теоретико-експериментальних результатів. Оцінка довготривалої поведінки ^{137}Cs і ^{90}Sr в у лісових екосистемах стала можливою лише після організації системи регулярних емпіричних спостережень, яка базувалася на сучасних досягненнях лісової, радіологічної та екологічної науки, засобів дистанційного зондування, радіометричних і лазерно-оптичних приладів, а обробка отриманих польових та дистанційних даних і прогнозування біопродуктивності й радіологічних показників – способом інтегрованої реалізації методів ГІС і машинного навчання на базі сучасного інтерактивно-обчислювального програмного забезпечення з відкритим кодом.

Відсутність повноцінної системи збору й обробки даних про радіологічний та екологічний стан лісових екосистем України, забруднених внаслідок аварії на Чорнобильській атомній електростанції (ЧАЕС) у 1986 році, тривалий період часу не дозволяла здійснити широкомасштабне прогнозування радіаційного забруднення компонентів лісу Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) і прилеглих територій, що створювало «інформаційний вакуум» для прийняття управлінських рішень лісокористувачами щодо проведення лісгосподарських заходів і

поводження із потенційною продукцією. Одночасно існує значний запит суспільства і місцевого населення щодо експертного інформаційного супроводу радіологічного стану таких територій у майбутньому (Yoschenko et al., 2018). Для задоволення зазначених потреб постала необхідність оцінити інтервальні показники депонування та перерозподілу найбільш небезпечних на цьому етапі радіонуклідів (^{90}Sr і ^{137}Cs), а також практично реалізувати прогнозування їх майбутнього вмісту для основних депо лісостанів, що вимагало знань про їхню біопродуктивність. Активний розвиток інформаційних технологій уможливив виконання цього завдання за допомогою сучасних алгоритмів дистанційного зондування, ГІС і машинного навчання, ґрунтуючись на значних обсягах достовірних даних спостережень із репрезентативних лісових ділянок (Briechle et al., 2020).

До 2020 року в Україні роботи в цьому напрямі перебували на рівні пошукових фундаментальних розробок. За останні декілька років опубліковано велику кількість праць, пов'язаних із просторовим розподілом радіоактивного забруднення та розподілом радіоізотопів у компонентах лісових екосистем (Romantschuk et al., 2021). Найбільшу кількість робіт, присвячених перерозподілу радіонуклідів на рівні окремих лісових ділянок, виконано японськими вченими за результатами досліджень трансформації радіоактивного викиду внаслідок аварії на АЕС Фукусіма-1. Особливо варто відзначити роботи Katsushi Kuroda, Akira Kagawa, Mario Tonosaki (2013), Yasunori Mahara, Tomoko Ohta, Hideki Ogawa, Atsushi Kumata (2014), Shinta Ohashi, Katsushi Kuroda, Tsutomu Takano, Youki Suzukia, Takeshi Fujiwara, Hisashi Abe, Akira Kagawa, Masaki Sugiyama, Yoshitaka Kubojima, Chunhua Zhang, Koichi Yamamoto (2017), Yuchi Onda, Hiroaki Kato (2014–2019) та багатьох інших (Yoschenko et al., 2017). У них детально описано динаміку перерозподілу радіонуклідів у компонентах лісових фітоценозів, здійснено спроби оцінити вплив різних абіотичних і біотичних факторів на цей процес. Хоча подібні дослідження проводилися після аварії на ЧАЕС, однак вони характеризуються значно меншим фактажем, тому часто їхні результати виявлялися суперечливими, проте все ж стали основою для сучасних наукових розробок. В Україні вивчення розподілу радіонуклідів у лісових екосистемах тривалий час активно здійснювалося співробітниками Поліського філіалу УкрНДЛГА О. О. Орловим і В. П. Красновим (Орлов, 2009; Краснов, 2016), Інституту агроєкології і природокористування Національної академії аграрних наук України Г. М. Чоботко, М. Д. Кучма, В. П. Ландін, Л. А. Райчук (Chobotko et al., 2018; Raichuk et al., 2025) та багато інших (Romantschuk et al., 2021). Окремо в дослідженні розглянуто аспекти ландшафтних пожеж, вторинної ресуспензії радіонуклідів та їх перенесення у складі димових аерозолів. Ці питання набули особливої актуальності впродовж останнього десятиліття через швидке зростання частоти виникнення пожеж на найбільш забруднених ділянках, вкритих лісовою рослинністю, у межах зон відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення (Talerko et al., 2021; Романчук & Устименко, 2022; Hu et al., 2024).

Просторовий перерозподіл штучних радіонуклідів найчастіше представляють у вигляді карт щільності радіоактивного забруднення ґрунту (Holiaka et al, 2023), які будуються на основі «точкових» обстежень території, або, якщо досліджуваний

радіонуклід чи його дочірній продукт розпадається із випромінюванням гамма-кванта, здійснюють гамма-зйомку зони інтересу (Smith et al., 2025). Однак встановлення розподілів вмісту ^{90}Sr і Cs із врахуванням показників просторової мінливості для окремих компонентів біомаси (особливо стовбура) є надзвичайно актуальним завданням для оцінювання надійності отриманих результатів з урахуванням географічного розміщення та інших атрибутивних показників лісових екосистем. Такий аспект цієї дисертації є абсолютно новим дослідженням, проведеним в Україні, і лише фрагментарно розкритий вченими інших держав (Šmídl & Hofman, 2013).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано відповідно до тематичного плану науково-дослідних робіт Національного університету біоресурсів і природокористування України за темами: «Використання досвіду аварії на Чорнобильській АЕС для створення системи реагування на ядерні аварії, що стосуються секторів продовольства і сільського господарства» (дослідна угода МАГАТЕ № 18173, 2013–2017 pp.), «Координація та впровадження пан-Європейського інструменту для радіоекології (COMET)» (грантова угода № 604974 в межах 7-ї рамкової програми ЄС, 2015–2017 pp.), «Вивчення біогеохімічного кругообігу ^{137}Cs в забруднених деревостанах» (замовлення IRSN (Франція) № CA32002400, 2015–2017 pp.), «Joint Ukrainian-Norwegian education programme in Environmental Radioactivity» (замовлення The Norwegian Centre for International Cooperation in Education за номером CPEA-2015/10108, 2017–2021 pp.), «Екстракція і аналіз отриманих витяжок зразків ґрунту з постраждалих внаслідок пожежі та уцілілих ділянок «Рудого лісу»» (договір № 50/20-2017, 2017 p.), «Експериментальна оцінка біогенних потоків ^{137}Cs в лісових екосистемах» (номер державної реєстрації 0113U003827, 2013–2017 pp.), «Науковий моніторинг радіобіологічних ефектів хронічного іонізуючого опромінення референтних видів рослин в зонах радіоактивного забруднення ЧАЕС» (номер державної реєстрації 0113U003831, 2013–2017 pp.), «Експериментально вивчити та оцінити біогенні потоки ^{90}Sr в лісових екосистемах» (номер державної реєстрації 0117U002535, 2017–2019 pp.), «Розробка методології оцінювання радіологічних наслідків використання радіоактивно забрудненої після аварії на ЧАЕС паливної деревини населенням» (номер державної реєстрації 0117U002536, 2017–2019 pp.), «Обґрунтування можливості використання радіологічно забрудненої після Чорнобильської аварії паливної деревини в промислових теплових енергетичних установках» (номер державної реєстрації 0117U002545, 2017–2019 pp.), «Поведінка у довкіллі та біологічний вплив Чорнобильських радіоактивних частинок» (дослідна угода МАГАТЕ № 17928, 2013–2017 pp.), «Покращання радіаційного контролю навколишнього середовища та законодавчої бази в Україні для екологічної реабілітації радіоактивно забруднених територій» (технічна допомога в межах японсько-українського проєкту SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development), 2016–2021 pp.), «Розробити сучасні способи прогнозування біопродуктивності і радіологічного стану лісів інтегрованими підходами ГІС та машинного навчання» (номер державної реєстрації 0120U101540, 2020–2022 pp.), «Прикладні рішення оцінювання радіоекологічного стану лісів,

забруднених внаслідок Чорнобильської аварії методами ГІС та машинного навчання» (номер державної реєстрації 0120U102089, 2020–2022 рр.), «Зовнішня дозиметрія надземних тварин і рослин Чорнобильської зони відчуження в Україні» (дослідницька угода МАГАТЕ № 26466, 2022–2027 рр.), «Розробка системи радіологічного захисту учасників пожежогасіння на радіоактивно забруднених землях» (номер державної реєстрації 0124U001040, 2024–2026 рр.). До виконання зазначених наукових тем дисертант залучався як керівник тематики або відповідальний виконавець окремих розділів і підрозділів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є виявлення закономірностей просторового, темпорального й біогеоценозного розподілу біологічно мобільних радіонуклідів і біомаси в найбільш радіаційно забруднених лісових екосистемах, а також диференціація цих насаджень щодо їх екологічних функцій та можливості господарського використання.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

- всебічний аналіз закордонного й українського досвіду інвентаризації та радіоекологічного моніторингу лісових екосистем на радіоактивно забруднених землях, включно з відкритими просторовими даними щодо щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs і ^{90}Sr , трендів лісового покриву тощо;

- розробити модифікований підхід на основі методики оцінювання біомаси анатомічних органів деревного стовбура П. І. Лакиди («Фітомаса лісів України», 2002) для визначення середньої питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs в деревах і органах стовбура: зовнішньої кори, внутрішньої кори, заболоні, ядра;

- дослідити точність експрес-оцінювання питомої активності ^{90}Sr в деревині сосни звичайної від рівня щільності потоку бета-частинок з поверхні кори стоячих дерев;

- встановити можливості дистанційної оцінки таксаційних показників деревостанів на прикладі соснових насаджень у межах зони відчуження;

- охарактеризувати закономірності сучасного вертикального перерозподілу ^{90}Sr і ^{137}Cs в мінеральній частині ґрунту, в підстилці в типових насадженнях зони відчуження навколо Чорнобильської АЕС;

- виявити закономірності радіального розподілу ^{90}Sr і ^{137}Cs залежно від віку в деревах сосни звичайної і берези повислої, оцінити мінливість вмісту зазначених радіонуклідів у деревах на обмежених ділянках розміром до 0,1 га за гомогенного радіоактивного забруднення та розміру вибірки понад 30 спостережень;

- розрахувати та виявити закономірності зміни коефіцієнтів переходу ^{90}Sr і ^{137}Cs з ґрунту до дерев та продуктивності деревостанів за контрастних лісорослинних умов на полігоні з однаковим якісним і кількісним складом чорнобильських радіоактивних випадінь;

- розрахувати для двох типових насаджень зони відчуження, представлених хвойним (сосновим) і листяним (березовим) деревостаном, кількісні показники основних депо та потоків ^{90}Sr і ^{137}Cs ;

- розробити та параметризувати моделі біогеоциркуляції ^{90}Sr на основі результатів оцінювання основних депо і потоків біологічно мобільних

радіонуклідів для двох типових лісових ділянок, а також визначити динаміку коефіцієнтів переходу ^{90}Sr з ґрунту до стовбурової деревини у разі застосування «стандартних» підходів до відбору проб, прийнятих у лісовій радіології;

- визначити радіологічну ситуацію щодо забруднення деревини ^{90}Sr у лісах за межами зони відчуження;

- змодельовати просторові шари розподілу щільності забруднення ґрунту основних чорнобильських радіоізотопів у межах українсько-білоруської зони відчуження на сьогодні та в майбутньому;

- оцінити вплив різних рівнів радіоактивного забруднення / дозового навантаження на радіальний приріст дерев сосни звичайної;

- представити структуру вхідних і вихідних даних, параметризувати та верифікувати XGBoost-моделі для оцінювання просторового і темпорального розподілу оцінювання радіоекологічних ознак лісових екосистем від рівня локальних майданчиків на основі надземних даних (площею до 0,1 га), аерофотополігонів від 3 до 25 га, ґрунтуючись на даних зйомки з БПЛА для всього регіону дослідження як і зони відчуження, на основі спектральних і радарних даних супутникової зйомки;

- розробити та здійснити реалізацію комплексного інтегрованого алгоритму із залученням підходів машинного навчання й ПС для моделювання суттєвих радіологічних, екологічних і господарських ознак у межах лісового фонду української частини зони відчуження для управління лісогосподарськими заходами;

- покращити точність визначення викиду активності ^{137}Cs біля межі вогню ландшафтних пожеж для різних горючих матеріалів, а також їх ознак на основі напівприродних пожежних мікроекспериментів для вдосконалення оцінювання поглинутих доз опромінення особами, які безпосередньо беруть участь у гасінні пожеж.

Об'єкт дослідження – радіоекологічна ситуація в лісових екосистемах, що зазнали радіонуклідного забруднення чорнобильськими випадіннями у 1986 році.

Предмет дослідження – радіоекологічні, таксаційні й інші ознаки лісів, їх взаємозв'язки та закономірності просторово-темпорального розподілу в місцях радіаційних випадінь ЧАЕС.

Методи дослідження. Теоретико-методологічні, методичні та експериментальні дослідження за темою дисертації здійснювались із застосуванням загальнонаукових і спеціальних методів пізнання, основним завданням яких є отримання достовірних емпіричних даних та подальше вдосконалення способів оцінюванням радіоекологічного стану лісових екосистем підходами інтерполяції й екстраполяції агрегованих даних на весь регіон досліджень. Використання великої кількості концепцій, підходів та методів різних дисциплін і галузей науки дозволило забезпечити комплексність наукової роботи та можливість валідації отриманих результатів.

Накопичення дослідного матеріалу виконано за допомогою підходів лісової таксації та лісівництва, із залученням однорідних за складом і структурою деревостанів у межах лісових та нелісових ділянок і використанням пробних площ. Встановлення лісотаксаційних показників здійснено завдяки суцільному

переліку дерев на експериментальних майданчиках, разом із тим одночасно здійснювалося картування облікованих дерев із використанням передових лазерно-оптичних систем Laser Technology Inc. – TruPulse 360B і програмного забезпечення MapSmart (США), а також Haglof – LaserGeo (Швеція). У всіх отриманих польових матеріалах після спеціальної обробки визначено вміст ^{137}Cs за допомогою гамма-спектрометрів, а також інструментальним і радіохімічним способами встановлено активність ^{90}Sr в пробах на бета-спектрометрах.

Обробку результатів досліджень здійснено класичними підходами математичної статистики та геостатистичного аналізу, а також із застосуванням алгоритму машинного навчання (XGBoost) для завдань регресії і класифікації.

Наукова новизна отриманих результатів. Ґрунтуючись на теоретико-методологічних і методичних засадах дисертаційного дослідження,

вперше:

- комплексно представлено закономірності перерозподілу ^{90}Sr і ^{137}Cs в деревному профілі стовбура (одночасно в радіальному та вертикальному напрямках) сосни звичайної у середньовікових деревах;

- встановлено закономірності радіального розподілу ^{90}Sr і ^{137}Cs у деревині стовбурів сосни звичайної та берези повислої. У дерев перелічених видів віком до 20-ти років характер розподілу обох радіонуклідів є подібним: їхня питома активність суттєво вища біля серцевини стовбура. У старших дерев сосни звичайної радіальний розподіл істотно відрізняється залежно від радіоізоотопу, тоді як у зріліших дерев берези повислої загальна тенденція радіального розподілу залишається подібною до тієї, що спостерігається в молодих дерев;

- відтворено динаміку перерозподілу ^{90}Sr та коефіцієнтів переходу цього радіоізоотопу з мінерального ґрунту до деревного стовбура у 1997–2025 рр. на прикладі двох типових деревостанів Українського Полісся з переважанням сосни звичайної та берези повислої, що дало змогу виявити на сучасному етапі зростання коефіцієнтів переходу (КП) ^{90}Sr , наближене до лінійного, за умови відбору проб мінерального ґрунту до глибини 20 см згідно з типовими підходами визначеними державними стандартами України;

- розроблено та верифіковано систему XGBoost-моделей для можливостей оцінювання радіоекологічних ознак на рівні окремих ділянок лісу площею до 0,1 га: на основі емпіричних даних польових вишукувальних робіт (радіологічні і таксаційні показники); ділянок вкритих деревною рослинністю, розміром до 50 га (на основі фотостереограмметричної зйомки з БПЛА); а також для цілого регіону на прикладі української частини Зони відчуження (базуючись на даних спектральних і радарних супутникових зображень);

- побудовано інтегрований алгоритм на основі XGBoost-моделей для комплексної оцінки просторового і темпорального розподілу радіологічних і таксаційних ознак у радіаційно забруднених лісах ЧЗВ;

- встановлено переваги й обмеження до оцінювання КП радіонуклідів (^{90}Sr і ^{137}Cs) із мінерального ґрунту до деревини стовбура за допомогою двох підходів: традиційного для лісової радіоекології групування даних за деревною породою та ґрунтовими умовами (едатопом) із подальшим розрахунком

середнього арифметичного і застосування метаалгоритму XGBoost. За ефективністю оцінювання вмісту ^{90}Sr у деревині порівнювані способи є статистично подібними, водночас алгоритми машинного навчання мають суттєву перевагу у прогнозуванні КП ^{137}Cs ;

- підтверджено можливість використання супутникових даних для оцінки КП ^{90}Sr та ^{137}Cs у стовбурову біомасу деревостанів ЧЗВ;

- експериментально встановлений високий рівень викиду ^{137}Cs під час спалювання зелених (живих) гілочок сосни звичайної із пагонами завтовшки до 1,0 см: за результатами досліджень частка вивільненої активності становить до 24 % загальної активності радіонукліда, локалізованої в тканинах органів крони, що істотно перевищує відповідний показник для повітряно-сухої підстилки (до 6 %);

удосконалено:

- методологію оцінювання біомаси і середнього вмісту біологічно мобільних радіонуклідів в анатомічних органах стовбура дерева для завдань лісової радіоекології;

набули подальшого розвитку:

- методичні підходи і моделі біогеоциклообігу радіонуклідів у лісових екосистемах;

- реалізація алгоритмів машинного навчання для радіоекологічних досліджень лісових екосистем;

- способи дистанційного оцінювання лісотаксаційних показників на основі статистик і просторових закономірностей цифрової моделі пологу (CHM), створеної за допомогою використання результатів стереограмметричної зйомки;

доповнено:

- статистики і невизначеності оцінювання питомої активності ^{90}Sr в деревині стовбурів сосни звичайної залежно від щільності потоку бета-частинок;

- закономірності вертикального розподілу ^{90}Sr і ^{137}Cs в сосняках в умовах дерново-підзолистих ґрунтів;

- особливості радіального перерозподілу і мінливість питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs в деревині стовбурів дерев сосни звичайної і берези повислої на основі «великої» вибірки спостережень ($N = 30$);

- дані про основні депо та потоки ^{90}Sr і ^{137}Cs в лісових екосистемах, а також про співвідношення зазначених радіонуклідів у деревному біогеоценозі;

- бази даних про радіологічні, екологічні і господарські ознаки на дослідних майданчиках у лісах зони відчуження;

- просторові дані про радіонуклідне забруднення ґрунтів в українсько-білоруській частині зони відчуження;

підтверджено:

- що коефіцієнти переходу ^{90}Sr із ґрунту в деревину сосни звичайної та берези повислої у умовах ЧЗВ зазвичай у 7–10 разів перевищували відповідні коефіцієнти переходу ^{137}Cs ;

- вплив високих рівнів іонізуючого випромінювання (за потужності зовнішньої дози 19,5–30,0 мкГр·год⁻¹ станом на 1 грудня 2016 року) на радіальний

приріст дерев сосни звичайної у 1988–1991 рр., що на основі реконструкції поглинутої деревним стовбуром дози відповідає 8,6–13,2 Гр з 6 травня 1986 р. до 15 серпня 1986 р. (100 днів).

Практичне значення отриманих результатів. Наукові розробки у вигляді науково-методичних і науково-довідкових рекомендацій, а також картографічних матеріалів, отриманих на основі дисертаційних досліджень під час здійснення державних тематик, впроваджено у виробничу діяльність Державного спеціалізованого підприємства «Екоцентр», підпорядкованого Державному агентству з управління зоною відчуження (акти впровадження від 13.12.2019 р. та 28.11.2022 р.). Результати дослідження використовуються в навчальному процесі під час викладання дисципліни в межах підготовки фахівців та написання кваліфікаційних магістерських робіт за спеціальністю 101 «Екологія» освітньої програми «Екологія та охорона навколишнього середовища» в Національному університеті біоресурсів і природокористування України, а також протягом реалізації спільної українсько-норвезької програми підготовки магістрів та аспірантів «Joint Ukrainian-Norwegian education programme in Environmental Radioactivity» (2015–2022 pp.).

Особистий внесок здобувача. Дисертація є науковою працею, виконаною особисто здобувачем, і є його науковим доробком. Основна частина наведених у роботі наукових положень, висновків і пропозицій належать особисто здобувачу. Постановка проблеми, визначення мети, формування завдань дослідження, розробка теоретико-методологічних і методичних підходів для встановлення закономірностей перерозподілу і кругообігу біологічно мобільних радіонуклідів, їх просторового, темпорального та біогеоценотичного розподілу в лісових екосистемах, а також інтерполяція і екстраполяція отриманих залежностей від рівня окремої ділянки / полігону лісу до цілого регіону дослідження, на прикладі української зони відчуження, виконано винятково здобувачем.

Деякі результати отримано у співпраці з іншими вченими чи науковими колективами або із залученням технічного персоналу і фахівців, які є авторами або носіями специфічних методик, що підтверджено спільними науковими публікаціями та посиланнями в тексті дисертації. Здобувачем здійснено узагальнення теоретичних і практичних положень, підготовлено текст дисертації, обґрунтовано висновки і рекомендації виробництву за результатами власних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні положення, висновки та рекомендації дисертації апробовано на міжнародних і всеукраїнських конференціях та симпозіумах: міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми лісового сектору та садово-паркового господарства» (м. Київ, 2016 р.), конференції «16-та українська конференція з космічних досліджень» (м. Одеса, 2016 р.), міжнародній науковій конференції «Сільськогосподарська та лісова радіологія – 30 років після Чорнобиля» (м. Київ, 2016 р.), міжнародній науковій конференції «Здоров'я лісів, екосистемні послуги та лісові продукти для суспільства» (м. Київ, 2017 р.), міжнародній науковій конференції «Ліси Східної Європи у світі, що змінюється» (м. Київ, 2017 р.), міжнародному симпозіумі ICRP та ERPM «4th International Symposium on the

System of Radiological Protection and 2th European Radiological Protection Research Week» (м. Париж, Франція, 2017 р.), науковій конференції «XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України» (м. Київ, 2018 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя» (м. Київ, 2018 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми розвитку лісової таксації, лісовпорядкування та інвентаризації лісів» (м. Київ, 2018 р.), щорічній науковій конференції «Наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАНУ за підсумками 2018 року» (м. Київ, 2019 р.), міжнародній конференції «XXV IUFRO World Congress» (м. Курітіба, Бразилія, 2019 р.), конференції «Conference ERAN2019 (Environmental Radioactivity Research Network)» (м. Цукуба, Японія, 2020 р.), міжнародному симпозиумі «Fukushima 10 years: Forest, River, Ocean, and Food – Remaining issues for restoration» (м. Фукусіма, Японія, 2021 р.), міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми дослідження лісових та урбоєкосистем України в умовах воєнного стану» (м. Київ, 2023 р.), симпозиумі «The 10th Annual Symposium of the IER, Fukushima University» (м. Фукусіма, Японія, 2024 р.), міжнародному 26-му конгресі IUFFRO (м. Стокгольм, Швеція, 2024 р.), 16-му міжнародному конгресі «The International Radiation Protection Association (IRPA)» (м. Орландо, США, 2024 р.) та 11-му міжнародному симпозиумі Інституту радіоактивності довкілля Фукусімського університету (м. Фукусіма, Японія, 2025 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано в 61 науковій і науково-методичній праці, зокрема: розділ монографії, 21 стаття в періодичних виданнях, проіндексованих в наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з них 14 статей опубліковано в наукових журналах із квартилями Q1 і Q2 та 5 статей у журналах категорії «А» з Переліку наукових фахових видань України, а також 14 статей у закордонних/міжнародних виданнях, 12 статей у наукових фахових виданнях України, включених до Переліку наукових фахових видань України, 1 стаття в інших спеціалізованих наукових виданнях, 17 матеріалів і тез наукових доповідей на конференціях і симпозиумах. За тематикою дисертації підготовлено 4 науково-методичні рекомендації / матеріали, отримано 5 авторських свідоцтв на твори і комп'ютерні програми та опубліковано 2 колекції даних, що відповідають принципам FAIR.

Структура та обсяг роботи. Дисертацію підготовлено у вигляді списку опублікованих наукових праць для захисту положень досліджень. Робота складається із вступу, основної частини та висновків. До основної частини дисертації включено 17 статей, опублікованих у наукових фахових виданнях, та одні науково-методичні матеріали, згруповані у 8 розділів. Загальний обсяг дисертації – 450 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «**Модифікації та апробація методів для оцінювання радіоекологічних показників**» обґрунтовано необхідність проведення модифікацій загальних підходів інших дисциплін або їх апробації для забезпечення репрезентативного оцінювання радіоекологічних оцінок на наступних етапах цього дослідження. Для вирішення цієї проблематики було здійснено модифікацію способу оцінки середньої щільності компонентів стовбура згідно з методикою П. І. Лакиди («Фітомаса лісів України», 2002), апробовано спосіб визначення питомої активності ^{90}Sr на основі щільності потоку бета-частинок з кори стовбурів сосни звичайної та оцінено точність визначення надземної біомаси сосняків ЧЗВ на основі стереограмметричної зйомки з БПЛА.

Базуючись на загальноприйнятих методах класичної лісової таксації та оцінювання біопродуктивності деревного стовбура, був модифікований спосіб визначення ^{90}Sr та ^{137}Cs в органах деревного стовбура: зовнішній корі, внутрішній корі (луб, камбій), заболоні та ядровій деревині. За основу взято методику П. І. Лакиди (2002) для оцінювання середньої базисної щільності компонентів стовбура. Вона заснована на обов'язковому стереометричному вимірюванні об'єму деревних дисків у свіжозрізаному стані та їх компонентів, які вирізаються на відносних висотах стовбура, що робить його малопридатним для оцінювання камбіальної частини кори та ядра стовбура через неможливість забезпечити їх лінійні проміри на достатньому рівні точності для оцінювання їх біомаси, оскільки їх товщина часто складає 1–3 мм. Тому здобувач звернувся до концепції лінійної щільності. Цей спосіб дозволив більш достовірно здійснити оцінку вмісту ^{137}Cs та ^{90}Sr у структурних частинах стовбурів модельних дерев під час вивчення їхніх біогенних потоків і депо.

Процес вимірювання вмісту ^{90}Sr у компонентах лісових екосистем із застосуванням радіохімічних методів потребує значних затрат часу та праці для отримання вихідних даних. Менш точна, однак швидка оцінка вказаного радіонукліда на етапі польових робіт може значно пришвидшити процес прийняття рішення про можливість залучення певної лісової ділянки до експериментальних робіт чи використання її у господарських цілях. Вітчизняні й іноземні наукові колективи часто присвячують публікації схожим експрес-методам визначення вмісту біологічно мобільних радіонуклідів (^{137}Cs і ^{90}Sr): питомої активності, щільності забруднення і т. д., тому що вони дозволяють значно зменшити обсяги польових й лабораторних робіт. Спираючись на зібрані польові матеріали з 13 експериментальних майданчиків, чистих за складом соснових деревостанів, виявлено тісні ($r = 0,85\text{--}0,94$), статистично значущі при $p=0,05$, зв'язки між питомою активністю ^{90}Sr у стовбурній деревині з результатами вимірювання щільності бета-потoku радіометром з поверхні кори деревних стовбурів сосни звичайної на висоті 1,3 м за допомогою радіометра-дозиметра *СТОРА-TV РКС-01* у межах 10 км зони навколо Чорнобильської АЕС. Встановлено прямі, лінійні залежності між усередненим вмістом ^{90}Sr у анатомічних частинах стовбурів дерев соснових деревостанів (заболоні, ядрі і всій деревині) та поверхневою щільністю потоку бета-частинок з кори дерев, що

використані для створення регресійних рівнянь, котрі придатні для попередньої оцінки питомої активності досліджуваного радіоізоотопу в деревині у польових умовах ($R^2 = 0,90\text{--}0,96$). Встановлені залежності вмісту ^{90}Sr від щільності потоку бета-частинок з поверхні кори стовбурів дерев можна рекомендувати як спосіб для експрес-вимірювання ^{90}Sr у деревині сосни звичайної. Цей експрес-спосіб оцінювання питомої активності радіонукліда придатний до використання за його питомої активності у деревині стовбура понад $1,5 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$, тому може наразі практично реалізовуватись лише у межах ЧЗВ.

Можливість здійснення дистанційного визначення показників екосистем за допомогою сучасних БПЛА є надзвичайно актуальною проблемою для територій ЧЗВ. Оскільки значна їх частина відноситься до радіаційно небезпечних земель та є важкодоступною, здобувач у співпраці з іншими науковцями апробував можливість застосування результатів стереограмметричної обробки фотознімків, отриманих під час дистанційного обстеження лісів за допомогою БПЛА (модель *Pantom 4 Pro, DJI*) для оцінювання запасів компонентів надземної біомаси деревостанів. Для забезпечення валідації результатів було закладено 31 експериментальний майданчик в соснових деревостанах під час польових надземних робіт на відстані 5–12 км від промислового майданчика ЧАЕС у 2018 році. Стереофотограмметричну обробку зображень аерофотографування використано для побудови тривимірних моделей рельєфу (DEM) та підстилаючої поверхні (DSM). Цифрова модель пологуг (CHM) створена на основі різниці вихідних растрів DSM і DEM.

Отримані надземні дані обстежень включали лісотаксаційні показники деревостанів (середній діаметр, середня висота і відносна повнота), що були використані для розрахунку надземної біомаси деревостанів за рівнянням з довідника «Нормативи оцінки компонентів надземної фітомаси деревостанів головних лісотвірних порід України» (2013). Регресійний аналіз виявив, що найбільш вдалою функціональною залежністю для оцінки компонентів біомаси деревостанів є звичайна лінійна залежність від статистик CHM в межах території майданчика (середнє арифметичне, квадратичне відхилення, медіана, 25% і 75% квантилі та інші); окрім компонентів хвої, де взаємозв'язки краще описуються алометричними рівняннями. Лінійне рівняння для оцінювання загальної біомаси сосняків з одним кутовим коефіцієнтом на основі лише середнього арифметичного значення CHM дозволив пояснити 79 % варіації залежної змінної. У разі застосування більш сучасних методів машинного навчання ця метрика має суттєво зрости, але вже навіть у такому випадку результати за цим аспектом підтверджують можливість застосування розглянутого підходу на практиці.

Другий розділ «Розподіл радіонуклідів в основних депо типових насаджень у Чорнобильській зоні відчуження» зосереджений на встановленні розподілів радіонуклідів ^{90}Sr і ^{137}Cs у двох основних їх депо в лісових екосистемах: ґрунті (мінеральний і органічний горизонти) та деревному стовбурі (переважно в деревині й обмежено в корі), а також узагальненому оцінюванню валового розподілу радіоізоотопів, спираючись на агрегації емпіричних даних власних досліджень та публікацій інших вчених.

Оцінювання закономірностей мінливості і радіального перерозподілу ^{90}Sr і ^{137}Cs у деревостанах сосни звичайної і берези повислої станом на 2020 рік виконано на двох кругових пробних площах, представленими чистими деревостанами 63 і 31 років відповідно. На кожній ділянці за допомогою бура ($d = 5,5$ мм) було відібрано 50 кернів. Аналіз польових і лабораторних вимірювань виявив суттєво вищу питому активність ^{90}Sr порівняно з ^{137}Cs у деревині обох видів (рис. 1), незважаючи на принаймні у 2 рази нижчу щільність забруднення верхнього 20-сантиметрового мінерального шару ґрунту. Навіть на відносно невеликих (до 0,1 га) і гомогенно забруднених радіоактивними випадіннями лісових ділянках (коефіцієнт варіації потужності амбієнтного еквівалента дози (ПАОЕД) < 20 %) геометричне середньоквадратичне відхилення питомої активності радіонуклідів у деревині між сусідніми деревами (на відстані до 30 м) склало 1,6–2,0, а співвідношення між максимальним та мінімальним значеннями концентрацій часто перевищувало позначку у 10 раз.

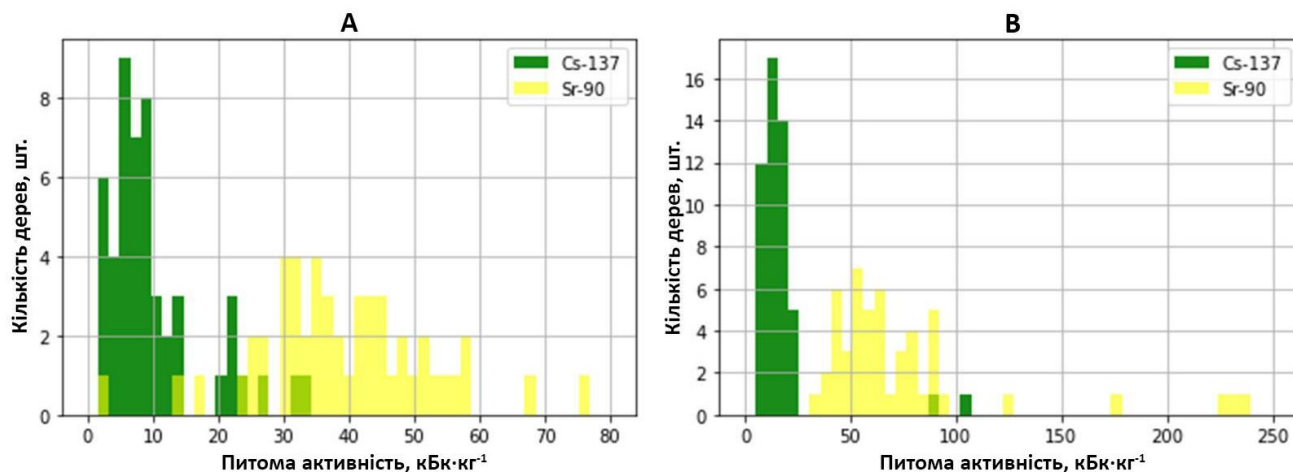


Рис. 1. Розподіл середніх питомих активностей ізотопів у стовбурній деревині на експериментальних майданчиках: А – сосновому, В – березовому

За матеріалами пробовідбору 2018–2020 рр, охарактеризовано радіальний розподіл ^{90}Sr і ^{137}Cs у стовбуровій деревині 12 дерев сосни звичайної віком 15–145 років і 9 дерев берези повислої віком 8–43 роки. На відміну від берези, де для обох радіонуклідів спостерігалася однакова тенденція зміни питомої активності (з максимумом у серцевині, зменшенням до периферії стовбура та вищою мінливістю для ^{137}Cs), для сосни визначальним фактором поведінки радіоізотопів виявився вік дерев (рис. 2). У молодих сосен до формування ядрової деревини поведінка ^{90}Sr і ^{137}Cs у деревині була схожа до дерев берези, хоча для ^{137}Cs вже відслідковувались піки активності у шарах деревини біля кори стовбура. За наявності ядрової деревини у дерев сосни умовно можна виділити три ділянки в радіальному напрямку з помітними відмінностями величин питомої активності ^{137}Cs : найвищі значення спостерігаються на периферії деревного стовбура (у заболоні, котра безпосередньо примикає до кори); в іншій частині заболоні вміст радіоізоотопу є відносно стабільним, але помітно меншим від периферійної заболоні; у ядровій деревині концентрація радіонукліда зменшується ще в середньому у 2–3 рази від питомої активності переважаючої частини заболоні. Подібні тенденції

спостерігаються й для ^{90}Sr у стовбуровій деревині дерев сосни, однак без обов'язкового піку на периферії та суттєво нижчим вмістом ізотопу в ядровій деревині, яка була сформована до аварії на ЧАЕС. Це вказує на низьку проникність ядрової деревини для цього хімічного елемента й можливість заготовляти менш забруднену деревину із старовікових сосен, порівняно з молодшими деревами у лісах ЧЗВ, за рівних ступенів забруднення відповідними радіонуклідами.

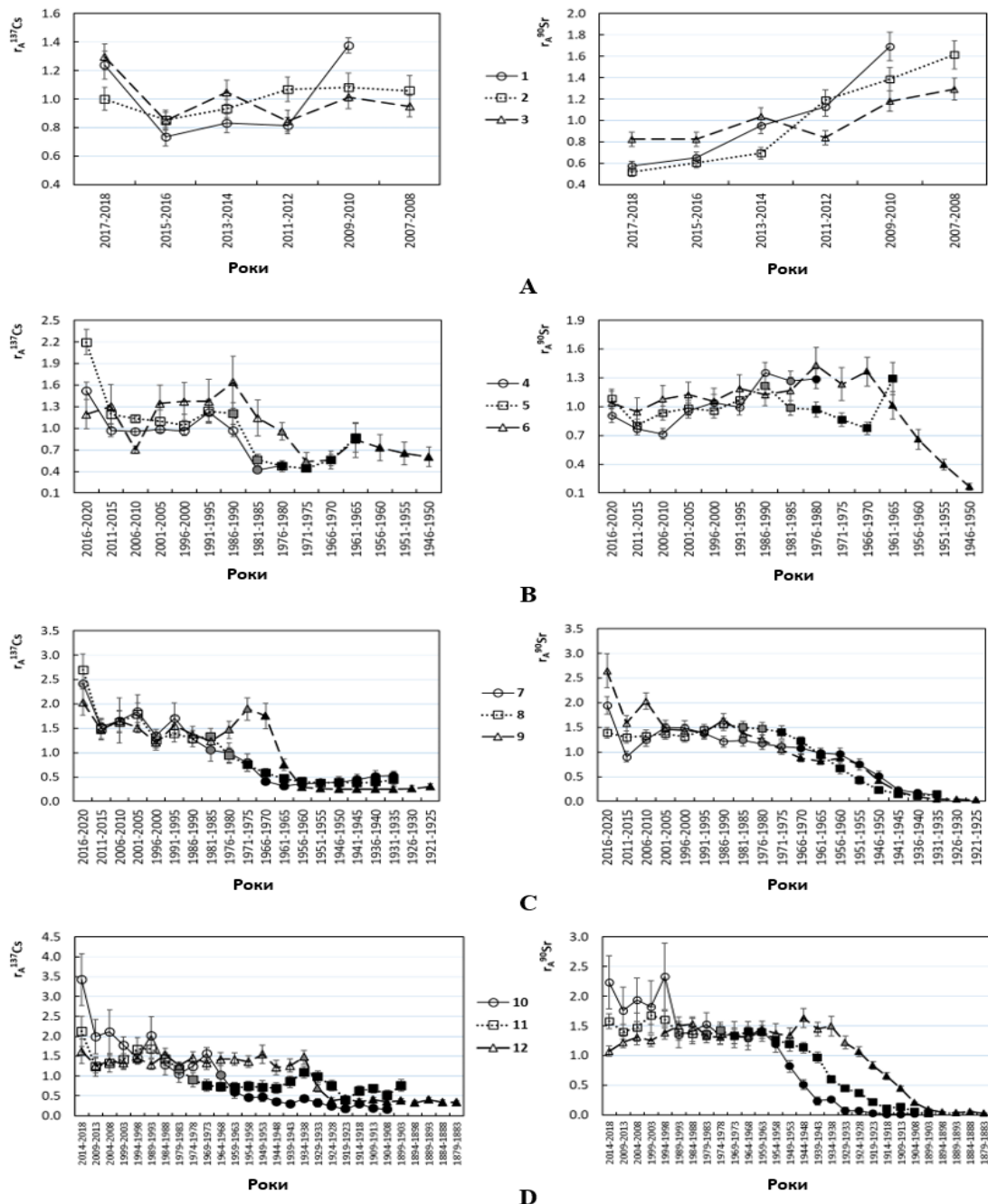


Рис. 2. Радіальний розподіл нормалізованих питомих активностей ^{137}Cs і ^{90}Sr в стовбуровій деревині дерев сосни на висоті 1,3 м (ліві графіки – ^{137}Cs , праві графіки – ^{90}Sr): А – дерева № 1–3 (15–17 років), В – дерева № 4–6 (51–82 роки), С – дерева № 7–9 (95–109 років), D – дерева № 10–12 (119–145 років); маркер без фону (○) – заболонь, із сірим фоном (◻) – перехідна частина між заболонню і ядром, чорний маркер (●) – ядро

Зіставлення даних про співвідношення питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у різних компонентах надземної біомаси (стовбуровій деревині, корі, гілках та хвої/листі), отриманих у власних дослідженнях та в працях інших вчених, дозволило встановити, що значення цих коефіцієнтів є доволі стабільними показниками незалежно від часу та регіону збору даних (табл. 1). Ця закономірність була використана для відтворення розподілу частки загальної активності у надземних органах дерев у шарах для 20 деревостанів (18 сосни звичайної і 2 берези повислої), відібраних протягом 2017–2020 рр., що дозволило відтворити загальний розподіл досліджуваних радіоізоотопів в них (рис. 3).

Таблиця 1

Узагальнені співвідношення питомих активностей ^{90}Sr і ^{137}Cs між стовбуровою деревиною (прийнята за «1») та іншими органами дерев сосни і берези за результатами цих і попередніх досліджень

Деревний вид	Радіонукліди	Співвідношення між питомими активностями у надземних органах дерев			
		стовбурова деревина	стовбурова кора	пагони	хвоя / листя
Сосна	^{90}Sr	1	$3,6 \pm 1,0$	$2,5 \pm 0,7$	$2,5 \pm 0,7$
	^{137}Cs	1	$3,5 \pm 0,7$	$7,0 \pm 1,1$	$3,1 \pm 1,1$
Береза	^{90}Sr	1	$5,7 \pm 1,6$	$7,9 \pm 3,7$	$5,1 \pm 0,5$
	^{137}Cs	1	$2,4 \pm 0,3$	$5,1 \pm 3,1$	$2,5 \pm 0,7$

Межа «лісова підстилка – мінеральний ґрунт» залишається найзабрудненішою зоною лісових екосистем за вмістом ^{137}Cs навіть після 30 років після аварії на ЧАЕС, але для ^{90}Sr – цей постулат не завжди витримується (рис. 3): суттєва його частина наразі локалізована у стовбурах дерев та їх кронах. Водночас у відносно багатих на мінеральні речовини ґрунтах регіону – зокрема на двох обстежених березових ділянках (майданчики № 2 та № 19 на рис. 3) та одній сосновій (пробна площа № 8 на рис. 3) – спостерігається схожий перерозподіл ^{90}Sr до ^{137}Cs , що зумовлено нижчим рівнем акумуляції цих ізоотопів біомасою рослин. Результати обстежень підтверджують гіпотезу про значно більшу вертикальну міграцію ^{90}Sr порівняно з ^{137}Cs в умовах дерново-підзолистих піщаних ґрунтів під сосняками (всі ділянки, крім вищеперелічених). Якщо понад 90 % активності ^{137}Cs локалізовано у верхньому 30-сантиметровому шарі ґрунту від валового у мінеральному горизонті глибиною до 100 см, то на більшій частині майданчиків, створених у соснових насадженнях, відзначається проникнення більшої частини ^{90}Sr нижче 30-сантиметрової глибини за вказаною ознакою (рис. 3, В).

Емпіричні дані питомих активностей ^{90}Sr та ^{137}Cs у шарах підстилки з різним ступенем деструкції органічної речовини у соснових деревостанах показали суттєві відмінності у закономірностях розподілу величини цього показника радіонуклідів: для ^{137}Cs відомо з попередніх досліджень про його концентрування при переміщенні з верхніх шарів до нижніх, для ^{90}Sr ця особливість не спостерігається, питома активність радіоізоотопу залишалася стабільною між різними шарами підстилки на всіх 20-ти досліджених експериментальних майданчиках.

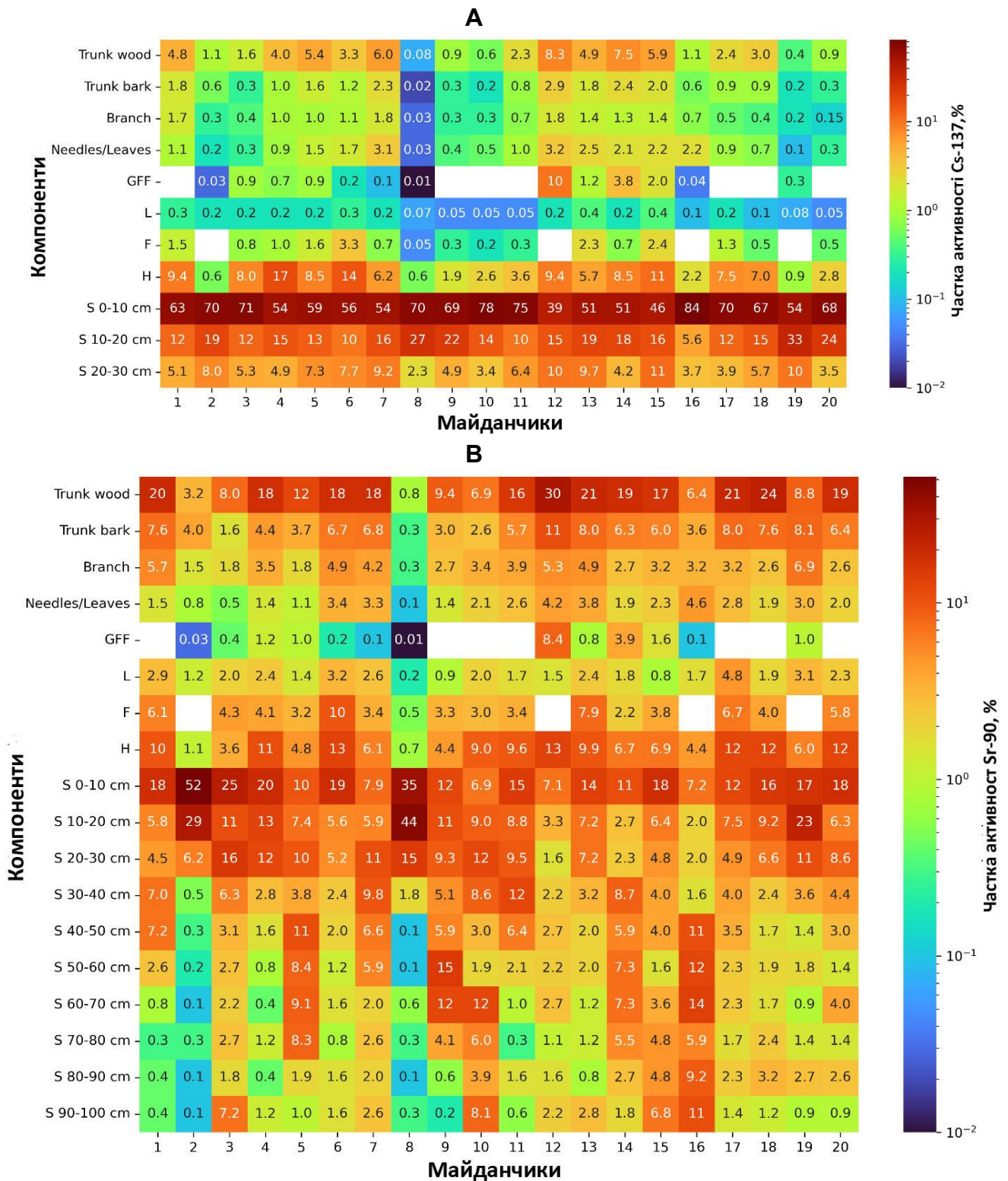


Рис. 3. Розрахована частка внеску активності ^{137}Cs (A) та ^{90}Sr (B) у кожному компоненті насадження (номери пробних площ 2 і 19 відповідають березовим насадженням, інші соснякам) від їх сумарної активності на дослідних ділянках в: Trunk wood – стовбутова деревина, Trunk bark – кора стовбурів, Branch – гілки, Needles/Leaves – хвоя/листя, GFF – живий надґрунтовий покрив, L – свіжий опад, F – фрагментована підстилка, H – гумосована підстилка, S h_u - h_l cm – мінеральний шар ґрунту на глибині з h_u по h_l cm від межі між органічним і мінеральним горизонтами.

Порівняння розрахованих значень КП ^{90}Sr у деревину стовбура з мінерального шару ґрунту глибиною 20 см та 100 см, дало змогу виявити, що для окремих закладених лісових ділянок (8 із 20), співвідношення між цими способами розрахунку відрізнялися у понад 2 рази, а для одного майданчика – 6,8 рази. Отримані КП радіостронцію на ділянках характеризуються значною мінливістю і навіть з врахуванням щільності забруднення мінерального ґрунту до 1,0 м є значно вищими за значення, рекомендовані довідником МАГАТЕ (2010). Це вказує на необхідність враховувати вказаний аспект при оновленні чи доповненні наявних рекомендацій для проведення лісогосподарських заходів у насадженнях на радіаційно небезпечних землях. КП ^{137}Cs з ґрунту до деревини навпаки переважно знаходяться в інтервалі, який зазначений у довіднику МАГАТЕ (2010).

Третій розділ **«Комплексне оцінювання потоків і депо ^{90}Sr і ^{137}Cs у типових насадженнях радіаційно забруднених лісів»** Присвячений детальному оцінюванню потоків і депо основних мобільних радіонуклідів у двох типових деревостанах ЧЗВ – хвойного (соснового) та листяного (березового), а також соснових культур, створених на територіях пунктів тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) «Рудий ліс» у межах та поза ділянками траншей/бортів із захороненнями радіоактивних відходів (залишків мертвого лісу). Використовуючи отримані дані річних спостережень за висхідними (ростові процеси) та низхідними (опад, відпад і вилуговування опадами з надземної біомаси дерев) потоками, було охарактеризовано частку перерозподілу ^{90}Sr та ^{137}Cs у виділених елементах досліджених лісових екосистем. Для насаджень сосни і берези, представлених середньовіковими деревостанами, до надземної біомаси дерев з мінерального ґрунту на непорушених територіях транслокується до 0,8 % валової частки радіоізотопів в екосистемі в річному вираженні на непорушених ґрунтах з моменту аварії на ЧАЕС.

У лісах ЧЗВ мінеральний ґрунт є й залишатиметься основним депо ^{90}Sr і ^{137}Cs для переважної більшості насаджень. Водночас, спостерігаються суттєві відмінності у перерозподілі ^{90}Sr і ^{137}Cs в органах дерев, їх питомі активності інколи можуть відрізнятись більше чим на порядок величини в межах одного дерева. Особливо це помітно для березового насадження, де, незважаючи на більшу частку біомаси деревини стовбура порівняно з корою, суттєво вища концентрація ^{90}Sr у корі спричинила більшу акумуляцію його активності саме в ній, ніж у деревині» Схожа ситуація спостерігається й між підземною та надземною біомасою для обох радіоізотопів у березових екосистемах.

Внесок висхідного потоку досліджуваних радіоізотопів у їх загальному запасі в лісових екосистемах визначається їх доступністю у ґрунті та приростом біомаси. Зібраний експериментальний матеріал з середньовікових сосняків та березняків вказує, що за рахунок ростових процесів у річному вираженні сумарний висхідний потік ^{90}Sr складає близько 1–4 %, для ^{137}Cs – 0,19–0,46 %, однак максимум третина активності залишається у довготривалих депо деревостанів (стовбурах, грубі гілки, грубе коріння), інша частина повертається з низхідним потоком (опадом, відпадом і рідкими опадами). У структурі низхідного потоку в деревостанах твердими фракціями опаду і відпаду дерев транспортується

у понад 10 разів більше активності ^{90}Sr , ніж метеорологічними водами, а ^{137}Cs – у понад 5 разів. Тому в подальших дослідженнях біогеоциркулю ^{90}Sr і ^{137}Cs метеорологічними опадами можна нехтувати.

Якщо для ^{137}Cs існує доволі розлога система математичних моделей кругообігу в лісових екосистемах, то для ^{90}Sr таких напрацювань помітно менше. У зв'язку з цим виконано симуляцію кругообігу саме для ^{90}Sr із використанням вихідних даних вимірювань активності радіонукліда для соснових насаджень. За результатами параметризації математичних моделей відтворено динаміку перерозподілу радіонукліда за період 1990–2035 рр. у сосняку (рис. 4), що не зазнавав впливу людини з 1986 року. Підтверджено, що наразі КП з мінерального ґрунту до глибини 20 см у стовбурову деревину для ^{90}Sr в соснових насадженнях ЧЗВ мають чітко виражену висхідну, майже лінійну, динаміку.

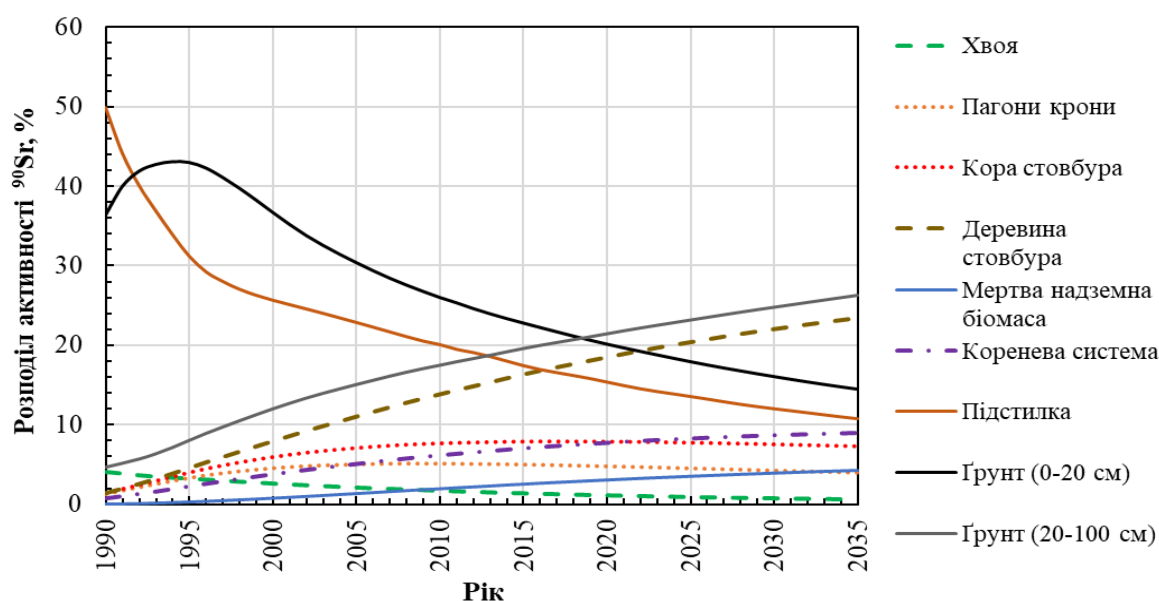


Рис. 4. Динаміка розподілу активності ^{90}Sr між відсіками соснового насадження

На ділянках захоронення радіоактивних відходів у ПТЛРВ «Рудий ліс» (траншеях, бортах) ЧЗВ, динаміка акумуляції ^{90}Sr в компонентах надземної біомаси посаджених дерев сосни збільшується не лише через збільшення біомаси, а й через зростання питомої активності радіонукліда в органах рослин ймовірно за рахунок «викачування» ^{90}Sr і ^{137}Cs разом з іншими макро- і мікроелементами кореневими системами дерев із траншей, де захоронений органічний матеріал доаварійного лісу. Порівняння валових запасів ^{90}Sr , акумульованих деревостанами сосни звичайної, що зростали на траншеях та поза ними у 2005 та 2018–2019 рр. чітко показують цю закономірність: на траншеях у надземній біомасі дерев депонована активність радіонукліда зросла з $\approx 100 \text{ ГБк} \cdot \text{га}^{-1}$ до $560 \text{ ГБк} \cdot \text{га}^{-1}$, а поза траншеями лише з $18 \text{ ГБк} \cdot \text{га}^{-1}$ до $23 \text{ ГБк} \cdot \text{га}^{-1}$ відповідно. Водночас за цей період надземна біомаса насаджень на траншеї зросла у понад 4 рази, тоді як поза нею лише у 2 рази. Це явище вказує на те, що ліси, які ростуть на ділянках ПТЛРВ, є одними з небагатьох місць, де спостерігається суттєве зростання концентрації ізотопу в тканинах дерев у ЧЗВ.

У четвертому розділі «Оцінювання забруднення деревини ^{90}Sr поза межами Чорнобильської зони відчуження» розглянуто сучасний стан забруднення промислової деревини в регіонах, що межують безпосередньо з ЧЗВ і в районах, віддалених від зони відчуження. Передусім увагу зосереджено на паливній деревині, оскільки саме вона має найнижчі допустимі рівні щодо вмісту ^{90}Sr і ^{137}Cs серед інших типів деревини і деревної продукції в чинному гігієнічному нормативі України (ГНПАР-2006).

Виконано збір польового матеріалу на 56 ділянках протягом 2015–2019 рр., де відібрано та проаналізовано закономірності просторового забруднення стовбурової деревини на висоті 1,3 м, оцінено мінливість КП з ґрунту до деревини для найпоширеніших деревних порід Українського Полісся, а також розроблено картографічні матеріали з виділенням територій, де згідно з вихідними статистиками спостережень поява деревини з перевищеннями допустимих рівнів для ^{90}Sr є найбільш імовірною. Незважаючи на помітно нижчі щільності забруднення ґрунту ^{90}Sr , порівняно з ^{137}Cs , для регіону, поза межами ЧЗВ, різниця між цим показником радіонуклідів переважно складає від одного порядку величини; перевищення ліміту для господарського використання деревини за питомою активністю ^{90}Sr є систематичним явищем. Це викликано такими причинами: на більшості лісових ділянок КП ^{90}Sr є помітно вищим за значення цього показника для ^{137}Cs , з одночасним більш жорстким нормативом щодо питомої активності ^{90}Sr в паливній деревині ($60 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$), тоді як для ^{137}Cs допустимий вміст є $600 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$.

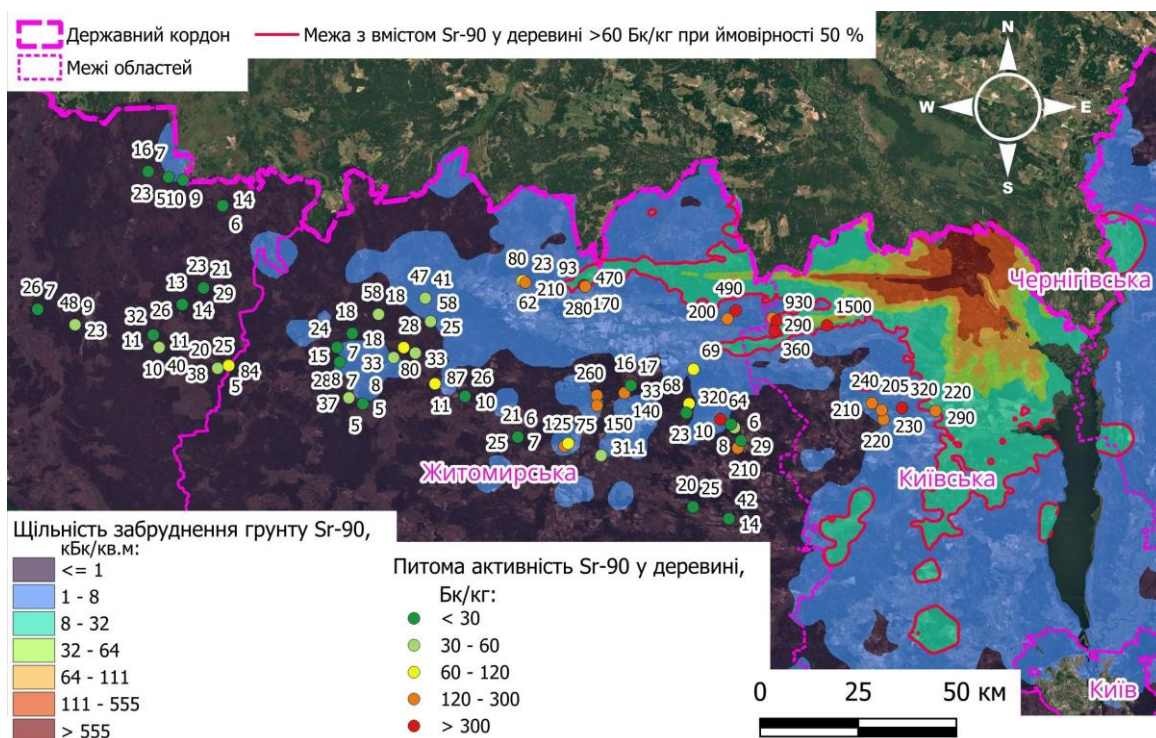


Рис. 5. Питома активність ^{90}Sr у стовбуровій деревині в межах Українського Полісся на основі пробовідбору 2017–2018 рр. (поза межами Іванківської територіальної громади): числові значення є питомі активності стовбурової деревини

Аналіз проб деревини сосни звичайної (2015–2019 рр.), відібраних в Іванківській об'єднаній територіальній громаді у 12-ти локаціях, підтверджує високі та радіологічно значущі рівні ^{90}Sr в деревині у разі їх заготівлі як паливної сировини. Перевищення допустимих рівнів зареєстровано у 82 % відібраних проб деревини із зімкнутих пристигаючих і стиглих деревостанів регіону ($>60 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$). Можна виділити такі основні напрямки чорнобильських радіоактивних випадіння поза межами ЧЗВ, що потребують підвищеної уваги щодо забруднення радіостронцієм і радіоцезієм у межах України: західний (північ Коростенського району Житомирської області), південно-західний (основні випадіння зосереджені безпосередньо поруч із ЧЗВ на межі Житомирської і Київської областей) та південний (Іванківська селищна територіальна громада Київської області).

П'ятий розділ **«Просторово-темпоральний розподіл території Чорнобильської зони відчуження за рівнями радіоактивного забруднення»** присвячено обробці даних, зібраних у процесі попередніх досліджень і вишукувальних робіт із визначення щільності забруднення ґрунтів (глибиною до 20 см) навколо ЧАЕС біологічно значущими радіонуклідами (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu та ^{241}Am) з 15 джерел інформації, які використані здобувачем для просторової реконструкції динаміки радіонуклідного забруднення ЧЗВ. Спочатку значення показників забруднення (вмісту радіонуклідів) були перераховані станом на 1 січня 2020 року й далі використовувалися для створення растрів, які представляють просторові розподіли для зазначених ознак. На наступному етапі було визначено динаміку цих показників у майбутньому, що дозволило здійснити реконструкцію просторового розподілу забруднення радіонуклідами ЧЗВ станом на 2086 рік.

З моменту ухвалення критеріїв зонування територій у 1991 р. в Законі України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» пройшло понад 40 років і радіологічна ситуація значно змінилася за цей період не лише поза межами ЧЗВ, а й у самій ЧЗВ. Наявні просторові шари з щільностями забруднення ґрунтів використано для встановлення межі радіоактивно небезпечних земель за списком радіонуклідів, розглянутих у вище зазначеному нормативно-правовому акті (^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{238-240}\text{Pu}$). Наразі до таких ділянок належить близько половини площі ЧЗВ й окремі ділянки поза нею, що представляють «плями» більш легкоплавких і хімічно активних ^{90}Sr і ^{137}Cs , якщо порівняти з трансурановими елементами. Варто лише зазначити, що в українському законодавстві чітко не розділяються ізомери Pu альфа-випромінювачі ($^{238-240}\text{Pu}$) від радіонукліда бета-випромінювача (^{241}Pu). Хоча останній і продукує ^{241}Am , але в разі включення його щільності забруднення ґрунту до щільності активності ізомерів $^{238-240}\text{Pu}$ для визначення меж радіаційно небезпечних земель, то це де-юре означає, що фактично навіть території, які безпосередньо примикають до м. Києва, можна віднести до радіоактивно небезпечних земель. Для дотримання формальної логіки в законодавстві має бути чітко зазначено, що визначення меж радіоактивно небезпечних земель здійснюється лише на основі сумарної щільності забруднення ґрунту ізотопами альфа-випромінювачами Pu ($^{238-240}\text{Pu}$).

За прогнозами нами даними через 100 років після аварії (у 2086 році), межі радіаційно небезпечних земель фактично збігатимуться з контуром існуючої 10-кілометрової зони навколо ЧАЕС, де саме довгоживучі ізотопи альфа-випромінювачі плутонію визначатимуть ділянки, які належатимуть до другої зони (зони безумовного (обов'язкового) відселення), оскільки регламентовані рівні щільностей забруднення ^{137}Cs і ^{90}Sr , внаслідок їх радіоактивного розпаду, не зможуть переважати критерій по ізотопах $^{238-240}\text{Pu}$ щодо віднесення ділянок до радіаційно небезпечних земель (рис.6).

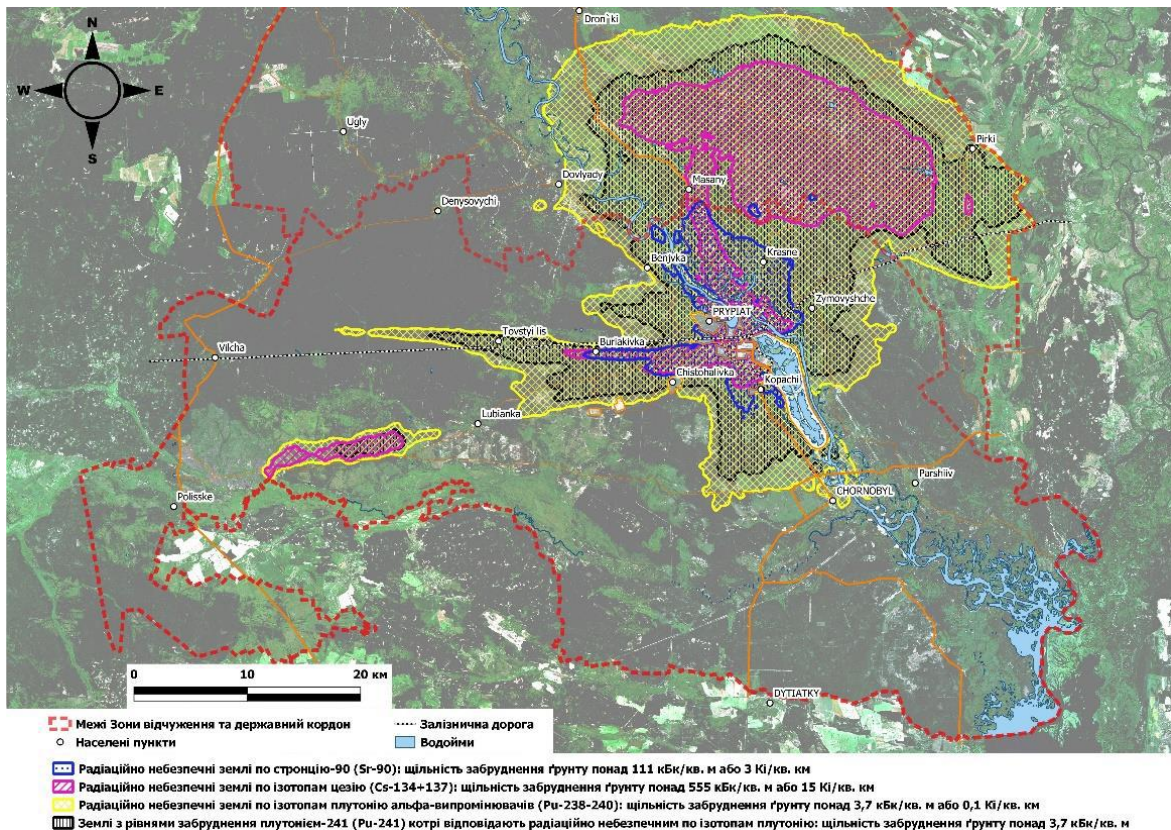


Рис. 6. Межі радіаційно небезпечних земель за щільністю забруднення ґрунтів ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{238-240}\text{Pu}$ і ^{241}Pu території ЧЗВ прогнозовано до 2086 р.

Отримані нами результати демонструють (рис. 6), що лише 10-кілометрова зона навколо ЧАЕС і ділянка південно-західного напрямку радіоактивних випадінь ЧАЕС біля с. Весняне залишатимуться «непридатними» для постійного проживання людей у ЧЗВ ще багато століть. Тому їх варто залучити до спеціального промислового використання для обслуговування радіоактивних відходів чи інших завдань, пов'язаних із поводженням з радіоактивними матеріалами.

У шостому розділі «Радіальний приріст дерев сосни звичайної за різних рівнів радіоактивного забруднення чорнобильським викидом» представлено дослідження впливу іонізуючого випромінювання, сформованого чорнобильським радіоактивним викидом 1986 року, на радіальний приріст дерев сосни звичайної за різних рівнів дозового навантаження. Здійснено реконструкцію динаміки потужності зовнішньої дози залежно від щільності забруднення ґрунту ^{137}Cs та ^{90}Sr від 6 травня 1986 р до моменту проведення досліджень.

У 2016 р. відібрано п'ять ділянок (сумарно 107 дерев) для цих досліджень на основі вимірювань потужності дози рентгенівського і гамма-випромінювання у повітрі на висоті 1,0 м. Три експериментальні ділянки підібрано перпендикулярно до осі вузького «західного сліду» радіоактивних випадінь на відстані 5–6 км від 4-го блоку ЧАЕС. Місцезнаходження цих ділянок характеризується високим градієнтом потужності зовнішньої дози (щільності радіонуклідного забруднення ґрунту), що змінювалась у межах відстані 500 м від $0,8 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$ до $40\text{--}60 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$. На момент дослідження на ділянках було зафіксовано такі значення потужності зовнішньої дози: $1,8\text{--}5,5 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$, $10,0\text{--}17,5 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$ та $19,5\text{--}30,0 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$. Два контрольних майданчики відібрано в аналогічних лісах за межами територій з підвищеним радіонуклідним забрудненням (рис. 7).

У межах зазначеного напрямку досліджень виявлено, що дерева сосни звичайної, які зазнали впливу сублетальних зовнішніх доз (відповідає потужності зовнішньої дози у $19,5\text{--}30,0 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$ станом на 01.12.2016 р.) на ділянці «Рудий ліс» та не загинули в період гострого опромінення (отримана доза $8,6\text{--}13,2 \text{ Гр}$ протягом 06.05–15.08.1986 р.), не продемонстрували відхилень щодо формування річних кілець через 30 років після аварії на ЧАЕС. Ці результати узгоджуються із зробленими раніше висновками, що екологічний стан деревостанів сосни звичайної може бути повністю відновлений протягом 30–40 років після гострого опромінення з дозами нижче 15 Гр .

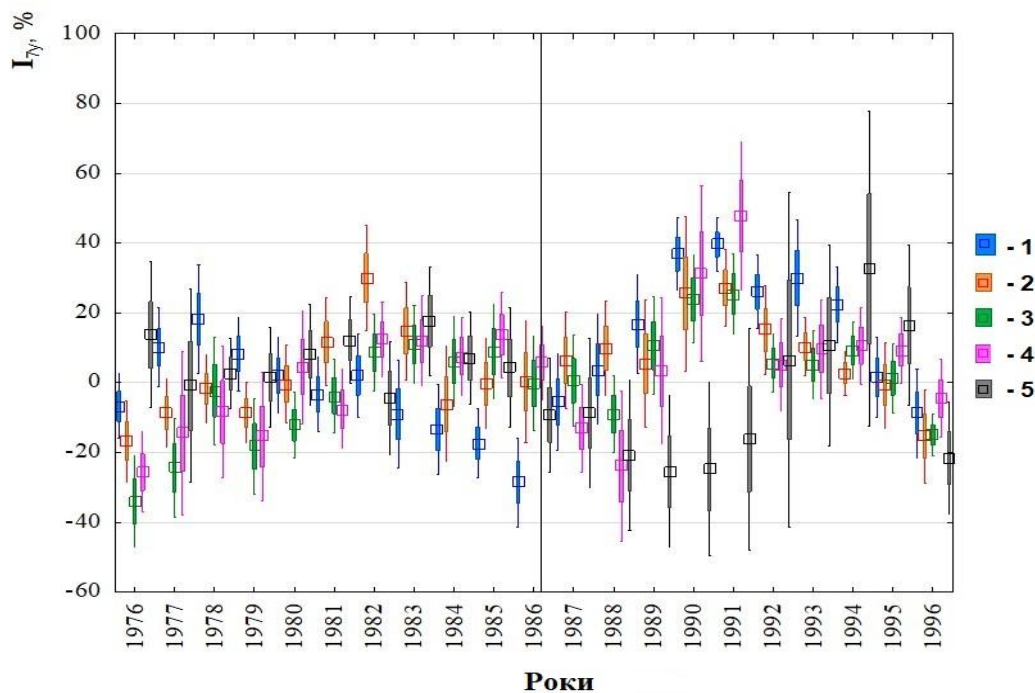


Рис. 7. Відносний радіальний приріст дерев сосни (середнє арифметичне і довірчий інтервал при $p=0,05$) на ділянках з різною потужністю зовнішніх доз (станом на 01.12.2016): 1 – $0,12 \pm 0,02 \text{ мкГз} \cdot \text{год}^{-1}$, 2 – $0,16 \pm 0,02 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$, 3 – $1,8\text{--}5,5 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$, 4 – $10,0\text{--}17,5 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$ та 5 – $19,5\text{--}30,0 \text{ мкГр} \cdot \text{год}^{-1}$

За результатами аналізу річних приростів кілець у 1986 і 1987 роках не було виявлено впливу опромінення на дерева, які ростуть на ділянках з різним рівнем забруднення (рис. 7). Однак ці ефекти чітко спостерігаються в більш пізній період

(через 3–5 років після аварії на ЧАЕС). Динаміка товщини річних кілець дерев сосни звичайної, яка формувалася під впливом потужності зовнішньої дози $4,4\text{--}6,7\text{ мГр}\cdot\text{год}^{-1}$ станом на 1 червня 1986 року ($19,5\text{--}30,0\text{ мГр}\cdot\text{год}^{-1}$ – станом на 1 грудня 2016 року), порівнюючи з деревами на менш забруднених і контрольних ділянках, характеризується статистично значущою різницею до 2000 року. Після 2000 року приріст дерев сосни звичайної на найзабрудненішій ділянці «Рудого лісу» досяг показників, які спостерігалися до аварії на ЧАЕС, а подальша синхронність щорічних відносних радіальних приростів стала аналогічною як і для дерев з ділянок із нижчими рівнями опромінення.

Сьомий розділ **«Комплексне просторово-темпоральне моделювання радіоекологічних показників лісів Чорнобильської зони відчуження»** розкриває можливості сучасних методів машинного навчання та дистанційного зондування для характеристики дерев'янисто-чагарникових фітоценозів в аспектах оцінювання компонентів надземної біомаси, КП, а також вмісту ^{90}Sr і ^{137}Cs в стовбуровій деревині за допомогою алгоритму машинного навчання XGBoost. Як незалежні змінні до структури рівнянь включено показники радіоактивного забруднення (щільність забруднення ґрунту ^{90}Sr і ^{137}Cs та ПАЕД), деревний вид, таксаційні ознаки деревостанів (середній вік, висоту, діаметр та абсолютну повноту), едафічні умови (трофотоп і гігротоп за класифікацією Алексєєва-Погребняка), а також в окремих випадках геодані: відстань і напрямок відносно ЧАЕС. Відбрано 209 проб деревини на 205 створених кругових пробних площах для формування навчальних вибірок для параметеризації моделей.

У межах цього напрямку порівняно якість оцінювання питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у деревині за допомогою моделей металгоритму XGBoost та типового для лісової радіоекології групування КП радіоізотопів. Диференціацію проведено за деревними видами та ґрунтовими умовами, щоб розрахувати й надалі застосовувати їхнє середнє арифметичне значення на основі надземних даних польових досліджень (табл. 2). Виявлено, що просте групування дозволяє отримати цілком співставні статистики з XGBoost моделями щодо встановлення вмісту ^{90}Sr , однак сучасний підхід машинного навчання має суттєву перевагу при поясненні мінливості питомої активності ^{137}Cs , що обґрунтовується більш складними функціональними залежностями ^{137}Cs , який через специфіку XGBoost алгоритму краще відтвориться його регресійними моделями.

Аналіз дистанційних даних, отриманих за допомогою стереграметричної обробки фотознімків з БПЛА (*Phantom 4 Pro*, *DJI*), засвідчив непридатність використання отриманої цифрової моделі пологую та RGB-каналів ортомозаїки для оцінювання показників акумулювання деревиною стовбурів ^{90}Sr і ^{137}Cs у лісових екосистемах ЧЗВ, оскільки параметризовані XGBoost моделі пояснювали близько 3–27 % (в межах 95 % довірчого інтервалу) варіації залежної змінної при оцінюванні КП досліджуваних радіонуклідів. Це надзвичайно низькі значення порівняно з оцінками надземної біомаси деревостанів на основі ідентичних зібраних матеріалів та методики, де довірчий інтервал R^2 знаходився в інтервалі 0,90–0,93, що наближається до рівня «ефективності» визначення біомаси деревостанів спираючись на надземні польові вимірювання лісотаксаційних показників.

Таблиця 2

Порівняння вихідних статистичних показників прогнозування питомої активності у стовбуровій деревині різними методами

Тип методу	Радіо- нуклід	Статистичні показники					
		R ²		RMSE		%RMSE	
		Me	CI 95%	Me	CI 95%	Me	CI 95%
Модель XGBoost із геоданими для прямого прогнозування питомої активності*	⁹⁰ Sr	0,88	0,85–0,91	0,67	0,60–0,74	9	8,0–10
	¹³⁷ Cs	0,84	0,79–0,88	0,80	0,72–0,91	14	12–15
Модель XGBoost без геоданих для прямого прогнозування питомої активності*	⁹⁰ Sr	0,83	0,78–0,87	0,80	0,71–0,89	11	9,5–12
	¹³⁷ Cs	0,74	0,69–0,80	1,03	0,92–1,11	17	15–19
Модель XGBoost для оцінювання КП із подальшим розрахунком питомої активності*	⁹⁰ Sr	0,87	0,82–0,90	0,72	0,66–0,82	10	8,7–11
	¹³⁷ Cs	0,76	0,70–0,82	0,99	0,88–1,08	17	15–18
Типовий розрахунок КП за статистичними даними, згрупованими за деревними породами та ґрунтовими умовами (класифікація Алексєєва–Погребняка)**	⁹⁰ Sr	0,85	–	0,83	–	11	–
	¹³⁷ Cs	0,55	–	1,25	–	21	–
Типовий розрахунок КП за статистичними даними, згрупованими лише за деревними породами**	⁹⁰ Sr	0,80	–	0,96	–	13	–
	¹³⁷ Cs	0,46	–	1,32	–	22	–

Примітка: * валідація з використанням тестових вибірок; ** валідація з використанням повної вибірки (N = 186 шт.) після вилучення спостережень, для яких не було щонайменше трьох повторень для одного деревного виду та одного типу ґрунтових умов за класифікацією Алексєєва–Погребняка; R² – коефіцієнт детермінації; RMSE – середньоквадратична похибка оцінюваної питомої активності, Бк·кг⁻¹; %RMSE – RMSE у відсотках від спостережуваного середнього арифметичного значення; Me – медіана; CI 95% – межі довірчого інтервалу за ймовірності 95%

Радарні і спектральні канали, отримані сенсорами супутникового угруповання Sentinel-1 і Sentinel-2, дозволили досягти кращого оцінювання КП ⁹⁰Sr і ¹³⁷Cs XGBoost моделями, ніж на основі БПЛА даних: в інтервалі R² 0,24–0,32. Хоча й за такої якості прогнозування моделями, вони виглядають малопридатними для практичного застосування з метою «достовірного» визначення радіонуклідів у компонентах біомаси, наприклад для заготівлі деревини в господарських цілях: за таких метрик, радіометричні вимірювання вмісту ⁹⁰Sr і ¹³⁷Cs у деревній продукції залишаються обов'язковим способом контролю не перевищення їхніх гігієнічно допустимих рівнів. Водночас параметризовані моделі можна використовувати принаймні для первинної ідентифікації ймовірних ділянок, де для досліджуваних радіоізоотопів мають спостерігатися екстремуми їх депонування в компонентах

біомаси дерев, що дозволило відтворити ймовірний просторовий розподіл КП ^{90}Sr і ^{137}Cs для деревостанів ЧЗВ та прилеглих територій (рис. 8).

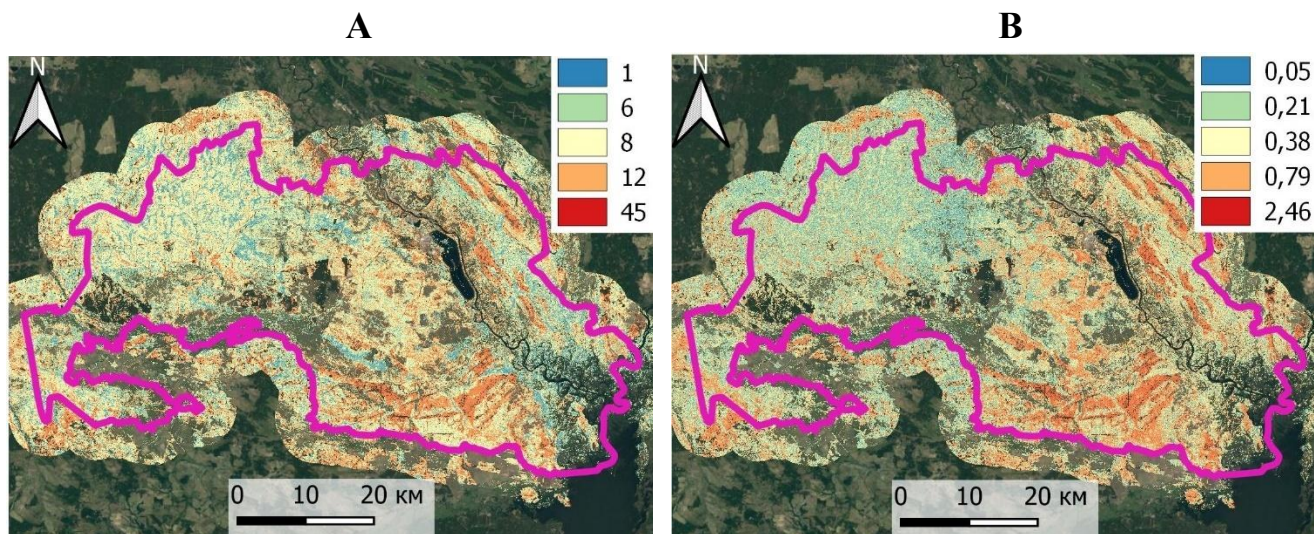


Рис. 8. Просторовий розподіл деревостанів ЧЗВ як неперервний діапазон значень, встановлених на базі супутникових даних 2019 року за: А – КП ^{90}Sr , $(\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}) \cdot (\text{кБк} \cdot \text{м}^{-2})^{-1}$; В – КП ^{137}Cs , $(\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1}) \cdot (\text{кБк} \cdot \text{м}^{-2})^{-1}$

Окремим заданням цієї частини дослідження стала інтеграція вихідних даних усіх шести попередніх розділів, за допомогою яких імплементовано алгоритм для прогнозування досліджуваних показників у межах лісового фонду ДСП «Північна пуца» в будь-який рік в інтервалі 2020–2050 рр., в якому навчені XGBoost-моделі інтегровано із: закономірностями росту деревостанів (ростовими моделями), результатами симуляції формування поглинутих доз деревною рослинністю, особливостями акумулювання біомаси і біологічно мобільних радіонуклідів у шарах підстилки, а також який враховує розпад радіонуклідів. Вихідна колекція даних щодо дерев'янистих фітоценозів, отримана таким способом, дозволяє сформувати на прогнозний рік вичерпний список растрів щодо просторового розподілу у ЧЗВ: класичних лісотаксаційних показників, рівнів радіонуклідного забруднення та біомаси всіх компонентів деревостану і підстилки, ймовірності перевищення встановлених допустимих рівнів за вмістом ^{90}Sr і ^{137}Cs у стовбуровій деревині, дозового навантаження іонізуючого опромінення на дерев'янисту рослинність. Це дає змогу комплексно формувати обґрунтовані управлінські рішення щодо реалізації лісогосподарських заходів на певній територіальній одиниці: на рівні окремої ділянки, з ранжування насаджень за їх господарською, радіологічною та екологічною ролями.

Отримані таким чином вихідні дані та картографічні матеріали було передано у вигляді науково-довідкових матеріалів для використання установами і підприємствами ДАЗВ, що здійснюють радіаційний контроль (ДСП «Екоцентр»), забезпечують ведення лісового господарства (ДСП «Північна пуца») і займаються природоохоронною діяльністю (Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник).

Восьмий розділ «Оцінка показників радіонуклідів у димових аерозолях під час ландшафтних пожеж у Чорнобильській зоні відчуження» присвячено історичним оцінкам показників вмісту радіонуклідів в аерозолях диму під час «великих» ландшафтних пожеж неподалік ЧАЕС у 2016 і 2020 роках та встановленню ймовірних дозових навантажень для учасників пожежогасіння за результатами вимірювання концентрації основних чорнобильських радіоізоотопів безпосередньо поруч із межею вогню та на станціях автоматизованої системи контролю радіаційного стану (АСКРС) у ЧЗВ співробітниками ДСП «Екоцентр». Окремо здобувачем здійснено серію мікроекспериментів з визначення викиду ^{137}Cs з різних типів горючих матеріалів відібраних безпосередньо в сосновому насадженні, на березовій ділянці та трав'яному ландшафті (всього 6 дослідних ділянок). Спалювання підстилки і живого надґрунтового покриву здійснювалось із збереженням її структури, оскільки розподіл радіоізоотопу є неоднорідним. Також для сосни звичайної було виконано роздільне пошарове спалювання шарів підстилки. Горючі матеріали спалювали як із природним розподілом вмісту вологи безпосередньо у відібраних пробах, так і з висушуванням останніх до повітряно сухого стану.

Результати пробовідбору аерозолів на пунктах АСКРС виявили зростання до 10 разів об'ємної активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у повітрі в напрямках поширення димового шлейфу під час пожежі у липні 2016 р. на ділянках «Рижого лісу». Будь-яких закономірностей між виміряними значеннями радіонуклідів на різних напрямках не виявлено. У деяких пунктах АСКРС на фільтрах більше було депоновано активності ^{90}Sr , для інших ^{137}Cs . Водночас на пунктах відбору повітря біля виселеного села Крива гора (понад 7 км від пожежі) та контрольно-пропускного пункту «Дитятки» (понад 28 км від пожежі) у кінці серпня на початку вересня того ж року спостерігалися подібні до пожеж спалахи активності радіоізоотопів, хоча в той період не було зафіксовано відкритих вогнищ у ЧЗВ чи на прилеглих територіях, тому їх походження не пов'язане з димовими аерозолями. Під час квітневої «великої» пожежі 2020 р., також фіксувалося зростання до 2 порядків активності ^{90}Sr , ^{137}Cs і $^{239+240}\text{Pu}$ на пунктах АСКРС. Однак можна констатувати, що навіть на відстані 0,5–1,0 км від межі ландшафтної пожежі в найбільш забруднених радіонуклідами ділянках перевищення допустимих рівнів концентрацій радіоізоотопів згідно з гігієнічними нормативами України є надзвичайно малоімовірним. До того ж розраховані дози при відборі проб димових аерозолів безпосередньо над лінією вогню на ділянках «Рижого лісу» у 2016 та 2020 роках вказують на те, що внутрішня доза, сформована за рахунок інгаляційного надходження чорнобильських радіонуклідів (^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ і ^{241}Am), складає близько третини від загального опромінення в ближній зоні навколо ЧАЕС поза межами пунктів ПТЛРВ. Тому саме потужність зовнішньої дози має залишатись найбільш важливим критерієм для оцінки опромінення працівників залучених до пожежогасіння у екосистемах поза індустріальними об'єктами.

Викид ^{137}Cs з горючих матеріалів (RF_{fuel} , %) у процесі проведення польових мікроекспериментів під час згорання лісової підстилки (соснового та березового насаджень), а також трав'яного покриву лугового походження

знаходилися в межах величин, що вже були опубліковані іншими вченими раніше. Водночас нами встановлено, що величина RF_{fuel} активності ^{137}Cs непорушеної соснової підстилки помітно залежить від її вологості: за інтервалу показника 5–13 % – RF_{fuel} склав $1,7 \pm 1,3$ %, тоді як за вмісту води 15–29 % частка емісії радіонукліду зменшилась приблизно в 10 разів ($0,16 \pm 0,12$ %).

Роздільне спалювання моху та шарів підстилки з соснового деревостану чітко вказує на те, що частка ^{137}Cs RF_{fuel} зменшується в процесі вигорання глибших шарів (рис. 9, А). Свіжий опад мав найвищий рівень викиду радіонукліду ($AM \pm SD$: $5,0 \pm 2,4$ %), за ним розташувався моховий покрив ($3,3 \pm 1,0$ %), тоді як гуміфікований шар характеризувався найнижчими значеннями ($0,19 \pm 0,19$ %). Окрім того, за припущення, що шари гіпотетично повністю вигоріли від самого верху до мінерального ґрунту, було розраховано показники RF_{fuel} для кожного шару, отримані в результаті роздільного спалювання. У такому випадку, узагальнене значення цього показника різко зменшується, коли горіння досягає гуміфікованого шару підстилки (до $0,60 \pm 0,43$ %) (рис. 9, В). Якщо гуміфікований шар не враховувати, RF_{fuel} зростає до $1,8 \pm 0,8$ %, що узгоджується зі значеннями, отриманими при спалюванні непорушених зразків із соснової ділянки ($1,7 \pm 1,3$ %), які поєднували моховий покрив (GFF) зі свіжим (L) та фрагментованими (F) шарами підстилки при вологості 5–13% (рис. 9).

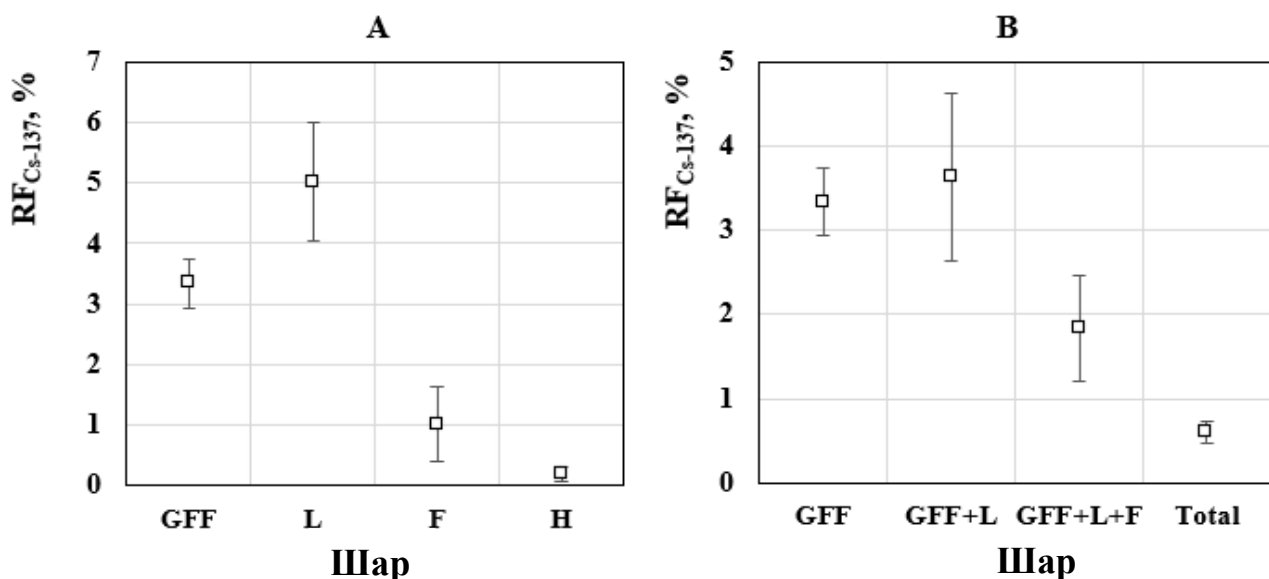


Рис. 9. RF_{fuel} ^{137}Cs при роздільному спалюванні GFF і шарів соснової підстилки (L, F, H) (А) та розраховані значення при їх гіпотетичному об'єднаному горінні вздовж вертикального профілю до мінерального ґрунтового горизонту (В)

Отже, хоча більша частина активності ^{137}Cs у лісовій підстилці локалізована в нижній гуміфікованій частині (близько 70–90 %), результати цього дослідження вказують на те, що верхні шари є основним джерелом викиду радіоізоотопу цезію в атмосферне повітря під час горіння, навіть в умовах екстремальної посухи. Іншим важливим результатом оцінки RF_{fuel} ^{137}Cs в аерозолях диму, що не описується в попередніх дослідженнях іншими вченими, стала надзвичайно висока емісія радіоізоотопу під час згорання/тління щойно

зрізаних зелених гілочок сосни звичайної (до товщини 1,0 см), яка може досягати 24 % від зосередженої в них валової активності, що значно перевищує рівні цього показника для шарів живого надґрунтового покриву та лісової підстилки (до 6 %).

ВИСНОВКИ

За результатами дисертаційного дослідження, агрегації даних зі створених експериментальних майданчиків у лісах на найбільш радіаційно забруднених землях України, вирішено важливу наукову проблему лісової радіоекології – диференціації насаджень і їх компонентів за екологічними функціями та можливостей господарського використання на основі узагальнень за закономірностями просторового, темпорального і біогеоценотичного розподілу техногенних радіонуклідів (^{90}Sr і ^{137}Cs) в лісових екосистемах:

1. Модифіковано та апробовано підходи на базі методики П. І. Лакиди (2002) для оцінки надземної фітомаси компонентів деревного стовбура для отримання можливості встановлення обсягів повітряно-сухої органічної речовини для зовнішньої кори, внутрішньої кори, заболонної і ядрової деревини з використанням показника лінійної щільності та наступним інтегруванням її функції на проміжку, що відповідає висоті (довжині) модельного дерева.

2. Підтверджено можливість використання показника щільності потоку бета-частинок, отриманого за допомогою вимірювань радіометром-дозиметром *СТОРА-TV РКС-01* з поверхні кори деревного стовбура дерев сосни звичайної, для попередньої оцінки вмісту ^{90}Sr в стовбурній деревині в польових умовах. Цей експрес-спосіб вимірювання питомої активності радіонукліда придатний до використання за питомої активності деревини стовбура понад $1,5 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$, тому може наразі практично реалізовуватись лише у межах ЧЗВ.

3. Підтверджено перспективність використання даних фотостереограмметрії, отриманих за допомогою БПЛА-зйомки для автоматичної класифікації верхівок найвищих дерев сосни та оцінювання надземної біомаси для поодиноких, куртинних і зімкнутих деревостанів сосни звичайної. Розроблено регресійні рівняння для зазначених цілей із використанням описових статистик СНМ-растрів, які дозволили пояснити до 79 % варіації залежної зміни(x).

4. Встановлено закономірності мінливості й радіального розподілу вмісту ^{90}Sr і ^{137}Cs в деревному стовбурі в окремих деревах сосни звичайної і берези повислої, що розміщуються по сусідству одне від одного (до 30 м); а також зміну трендів питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs радіальному напрямку деревини стовбура для вказаних деревних видів за різного віку: сосни – від 15 до 145 років, берези – від 8 до 43 років. Більше того навіть на відносно невеликих (до 0,1 га) і гомогенно забруднених радіоактивними випадіннями лісових ділянках (коефіцієнт варіації ПАЕД $< 20 \%$) мінливість питомої активності деревини між сусідніми деревами (до 30 м) становить (GSD) 1,6–2,0. Виявлено значні відмінності в локалізації концентрацій ^{90}Sr і ^{137}Cs в деревині сосни й берези: якщо для хвойного виду відмічається найменший вміст ^{137}Cs біля серцевини стовбура за наявності ядрової деревини, то для м'яколистяного дерева у всіх відібраних

екземплярах найвищі рівні питомої активності ^{137}Cs і ^{90}Sr спостерігалися в ранній (центральної) деревині стовбура незалежно від віку досліджуваного дерева.

5. Оцінено сучасний перерозподіл запасів активності ^{90}Sr і ^{137}Cs в основних депо соснових і березових насаджень (за результатами спостережень на 20-ти експериментальних майданчиках). Підтверджено гіпотезу про значно більшу вертикальну міграцію ^{90}Sr , порівнюючи з ^{137}Cs в умовах дерново-підзолистих піщаних ґрунтів під сосняками. Якщо понад 90 % активності ^{137}Cs локалізовано у верхньому 30-сантиметровому шарі ґрунту, то на більшій частині експериментальних майданчиків, створених у соснових насадженнях, відзначається проникнення більшої частини ^{90}Sr нижче 30-сантиметрової глибини мінерального шару ґрунту.

6. Деструкція підстилки в соснових насадженнях супроводжується концентруванням активності ^{137}Cs у її шарах за збільшення ступеня розкладання, водночас для ^{90}Sr цей процес не спостерігається.

7. КП ^{90}Sr в анатомічні частини деревини стовбура, отримані на основі щільності забруднення радіоізотопом мінерального шару ґрунту до глибини 1,0 м, характеризуються значною мінливістю та є значно вищими за рекомендовані значення МАГАТЕ. Навпаки, КП ^{137}Cs з ґрунту до деревини переважно знаходяться в інтервалі, який зазначений у довідниках МАГАТЕ (2010).

8. Основним депо для ^{137}Cs на вивчених лісових ділянках є ґрунт, для ^{90}Sr виділити елемент з найбільшими його запасами значно важче через невизначеності кінцевих результатів, однак можна сформулювати певну послідовність, починаючи з найбільшої ймовірності найбільших запасів активності: ґрунт, надземна біомаса (соснове насадження) / підземна біомаса (березове насадження), надземна біомаса (березове насадження) / лісова підстилка (соснове насадження).

9. У структурі низхідного потоку ^{90}Sr і ^{137}Cs в деревостанах твердими фракціями опадів і відпаду дерев транспортується у понад 10 разів більше активності ^{90}Sr , ніж метеорологічними водами, а ^{137}Cs – у понад 5 разів. Тому в подальших дослідженнях біогеоциркуляції біологічно мобільних радіонуклідів метеорологічними опадами можна нехтувати, особливо стовбуровим стоком на який приходить до 2 % від загальної активності досліджуваних радіонуклідів, що переносяться низхідними потоками.

10. Модель кругообігу ^{90}Sr у хвойних лісових екосистемах в умовах суттєвої вертикальної міграції цього радіонукліда в ґрунтах (коли понад 50 % активності перебуває нижче 20-сантиметрового верхнього шару ґрунту) підтверджує майже лінійне збільшення КП зазначеного радіоізоотопу з ґрунту до компонентів біомаси з часом, якщо використовувати щільність забруднення ґрунту ^{90}Sr на глибину 20 сантиметрів. Повністю нівелювати це систематичне відхилення неможливо, але можливо його суттєво зменшити, якщо використовувати щільність забруднення ґрунту ^{90}Sr на нижчу глибину, де локалізуватиметься понад 90 % валового запасу вказаного радіоізоотопу.

11. На ділянках пунктів тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) «Рудий ліс» спостерігається збільшення запасів активності ^{90}Sr в компонентах надземної біомаси культур сосни не лише внаслідок ростових процесів,

а й через збільшення в них питомої активності радіонукліда, що на сьогодні не ідентифікується в деревостанах ЧЗВ на непорушених ґрунтах. Імовірно, явище спричинено поступовим поглинанням радіоізоотопу з місць захоронення кореневими системами дерев та його акумуляцією, зокрема, в надземних органах.

12. Аналіз проб деревини сосни (2015–2019 рр.), відібраних в Іванківській об'єднаній територіальній громаді, підтверджує високі та радіологічно значущі рівні ^{90}Sr в деревині у разі їх заготівлі як паливної сировини. Перевищення допустимих рівнів ^{90}Sr зареєстровано у 82 % відібраних проб деревини із зімкнутих пристигаючих і стиглих деревостанів регіону ($>60 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$). Подібна ситуація спостерігається і для інших вкритих лісом територій, що примикають до ЧЗВ, – Житомирська та Київська адміністративні області.

13. Базуючись на основі колекцій даних різних установ, наукових проєктів і вчених щодо радіоактивного забруднення зони відчуження і прилеглих територій внаслідок аварії на ЧАЕС у 1986 р., адаптовано й уточнено просторові та темпоральні розподіли показників забруднення українсько-білоруської частини зони відчуження основними дозоутворюючими радіонуклідами (щільності забруднення ґрунту ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu і ^{241}Am). Встановлено, що через 100 років після аварії на ЧАЕС (у 2086 р), територія котра відноситься до другої зони (зони безумовного (обов'язкового) відселення), згідно з критеріями визначених українським законодавством, включатиме лише десятикілометрову зону навколо ЧАЕС і ділянку на південно-західного напрямку радіоактивних випадінь ЧАЕС біля с. Весняне.

14. Зменшення радіального приросту дерев сосни звичайної за різних рівнів поглинутих доз статистично доведено лише для групи дерев, яка вижила в умовах летальної зони ураження іонізуючим випромінюванням (загинуло понад 90 % дерев) внаслідок аварії на ЧАЕС (8,6–13,2 Гр на ділянці «Рудий ліс» у 1986 році, або ПАЕД $19,5\text{--}30,0 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$ станом на 01 грудня 2016 р.), якщо порівняти їх із контрольними лісовими ділянками (ПАЕД $0,14\text{--}0,16 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$) чи навіть з прилеглими безпосередньо до сублетальної зони Західного радіоактивного сліду викиду ЧАЕС деревостанів сосни звичайної (ПАЕД $1,8\text{--}17,5 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$). Ефект зменшення товщини річних кілець сосни від опромінення проявився через 2–3 роки після аварії та спостерігався ще принаймні 5 років.

15. Створено та параметризовано XGBoost-алгоритми для оцінювання в лісах ЧЗВ стовбурового запасу, компонентів надземної біомаси деревостанів і вмісту біологічно мобільних ізоотопів ^{137}Cs та ^{90}Sr в стовбуровій деревині із залученням надземних даних про атрибути насаджень: лісотаксаційні, географічні, радіологічні та інші види показників із експериментальних майданчиків лісових ділянок, а також за результатами стереограмметричної фотозйомки з БПЛА та зображень спектральної і радарної космічної зйомки супутникового угруповання Sentinel. XGBoost-моделі можуть значно краще відтворювати функціональні залежності вмісту ^{90}Sr і ^{137}Cs , ніж попередні типові підходи лісової радіоекології, й хоча на основі надземних вимірювань ^{90}Sr ці підходи не мали доведених суттєвих відмінностей, однак отримання достовірних оцінок рівня депонування радіонуклідів деревною біомасою деревостанів на основі супутникових даних можливо лише із застосування алгоритмів машинного навчання.

16. Розроблено алгоритм мовою Python з інтеграцією бази даних лісовпорядкування ДСП «Північна пуша» за 2016 рік, навчених моделей XGBoost для оцінювання стовбурового запасу, компонентів надземної біомаси деревостанів і вмісту біологічно мобільних ізотопів ^{137}Cs та ^{90}Sr в стовбуровій деревині, а також з урахуванням розпаду радіонуклідів, динаміки таксаційних показників для можливості прогнозування зазначених показників насаджень у будь-який період часу в проміжку 2020–2050 рр.

17. За допомогою емпіричних даних мікропожежних польових експериментів виявлено, що викид активності ^{137}Cs в атмосферне повітря у вигляді аерозолів під час згорання щойно зрізаних зелених гілочок сосни звичайної може досягати 24 % від зосередженої в них валової активності, що значно перевищував рівні цього показника для шарів живого надґрунтового покриву та лісової підстилки (до 6 %).

ПРОПОЗИЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

За результатами проведених досліджень лісових екосистем на радіаційно забруднених землях в зоні відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення внаслідок аварії на ЧАЕС (1986 р.), а також прилеглих територіях, для практичного використання виробничим і науковим підрозділам установ та організацій, що здійснюють свою діяльність у регіоні, запропоновано, зокрема:

- модифіковану методику оцінювання біомаси анатомічних органів деревного стовбура на основі запропонованих П. І. Лакидою підходів (2002 р.), з роздільним визначенням біомаси зовнішньої кори, внутрішньої кори, заболоні і ядра (за наявності) і використанням лінійної щільності для завдань лісової радіоекології;
- регресійні рівняння для оцінювання вмісту ^{90}Sr в анатомічних органах стовбурової деревини сосни звичайної в польових умовах без зрізування дерев;
- вдосконалені просторові растрові шари і мапи щільності забруднення ґрунту ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{238-241}\text{Pu}$ і ^{241}Am та потужності амбієнтного еквіваленту дози в межах українсько-білоруської зони відчуження;
- у вигляді науково-методичних рекомендацій – результати моделювання закономірностей перерозподілу ^{90}Sr в типових лісових хвойних і листяних насадженнях зони відчуження до 2035 р., з оцінкою динаміки коефіцієнтів переходу досліджуваного радіонукліда з ґрунту до стовбурів дерев;
- способи і регресійні рівняння для визначення таксаційних показників дерев (висоту) і деревостанів (надземну біомасу) сосни звичайної із використанням цифрової моделі пологу крон (СНМ), отриманої за результатами аерофотозйомки з БПЛА;
- параметризовані XGBoost-алгоритми для оцінювання в зоні відчуження (деякі можна використовувати, зокрема, за її межами) стовбурового запасу, компонентів надземної біомаси деревостанів і вмісту біологічно мобільних ізотопів ^{137}Cs та ^{90}Sr в стовбуровій деревині із залученням надземних даних про атрибути насаджень: лісотаксаційні, географічні, радіологічні та інші види показників із експериментальних майданчиків лісових ділянок, а також на основі даних стереограмметричної фотозйомки (СНМ і ортофотоплану в RGB-кольорах) з БПЛА

та зображень спектральної і радарної космічної зйомки супутникового угруповання Sentinel;

- комплексний алгоритм, написаний мовою Python з інтеграцією шарів колекції даних лісовпорядкування лісового фонду Державного спеціалізованого підприємства «Північна пуща» і розроблених XGBoost-моделей для розрахунку просторового і темпорального розподілу таксаційних, екологічних і радіологічних показників лісів у межах української частини зони відчуження в інтервалі 2020–2050 років. Алгоритм дозволяє оцінити такі найважливіші показники: вміст ^{90}Sr і ^{137}Cs в деревині стовбурів дерев як середнє геометричне значення, ймовірність перевищення допустимих рівнів забруднення в деревині стовбурів для ^{90}Sr і ^{137}Cs з урахуванням мінливості показника на ділянках, запас стовбурів у корі, біомасу надземних компонентів деревостану, запас і забруднення шарів підстилки біологічно мобільними радіонуклідами та інші ознаки. Вихідними продуктами алгоритму є растри з геопросторовою прив'язкою в системі координат EPSG:32636 – WGS 84 / UTM zone 36N.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті в наукових періодичних виданнях, віднесених до першого і другого
квартилів (Q1 і Q2) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country
Rank або Journal Citation Reports**

1. ^{90}Sr content in the stemwood of forests within Ukrainian Polissya / Bilous A., **Holiaka D.**, Matsala M., Kashparov V., Schepaschenko D., Lakyda P., Shvydenko A., Myroniuk V., Otreshko L. *Forests*. 2020. Vol. 11. Issue 3. 270. URL : <https://doi.org/10.3390/f11030270>. (*Bilous A. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Здобувачем проаналізовано фахову літературу, розраховано коефіцієнти переходу ^{90}Sr з ґрунту в стовбурову деревину та статистику розподілів показника для м'яколистяних деревних видів. Matsala M. виконано розрахунки для описових статистик, підготовлено картографічні й інші графічні матеріали, проведено первинне редагування драфту статті. Kashparov V. проаналізовано вихідні узагальнення статті та сформовано висновки. Schepaschenko D. проаналізовано вихідні результати ростових моделей деревостанів. Lakyda P. проведено валідацію ростових моделей. Shvydenko A. проаналізовано вихідні результати ростових моделей деревостанів. Myroniuk V. проведено початкове редагування чернетки статті. Otreshko L. надано результати польових і лабораторних вимірювань щодо вмісту ^{90}Sr в деревині дерев).*)

2. Effects of radiation on radial growth of Scots pine in areas highly affected by the Chernobyl accident / **Holiaka D.**, Fesenko S., Kashparov V., Protsak V., Levchuk S., Holiaka M. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 222. 106320. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106320>. (*Holiaka D. здійснено постановку проблеми, зібрано польовий матеріал, виконано методичне обґрунтування розрахунків для оцінювання відносних приростів деревини для*

дерев сосни звичайної за різних рівнів потужності поглинутих доз у повітрі, узагальнено отримані вихідні результати. Fesenko S. підготовлено підрозділ з ретроспективним оглядом попередніх досліджень за напрямом тематики статті та здійснено редагування остаточної версії статті. Kashparov V. розраховано поглинуті дози іонізуючого випромінювання на ділянках з різними рівнями ураження дерев сосни звичайної. Protsak V. взято участь у зборі польового матеріалу. Levchuk S. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr . Holiaka M. реалізовано камеральні вимірювання річних приростів дерев сосни звичайної).

3. Distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity concentrations in trunk of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Chernobyl zone / **Holiaka D.**, Yoschenko V., Levchuk S., Kashparov V. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. Vol. 222. 106319. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106319>. (Holiaka D. проаналізовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та виконано статистичний аналіз і узагальнення отриманих результатів. Yoschenko V. здійснено редагування фінального тексту статті. Levchuk S. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr . Kashparov V. взято участь у зборі польового матеріалу).

4. Scots pine stands biomass assessment using 3D data from unmanned aerial vehicle imagery in the Chernobyl Exclusion Zone / **Holiaka D.**, Kato H., Yoschenko V., Onda Y., Igarashi Y., Nanba K., Diachuk P., Holiaka M., Zadorozhniuk R., Kashparov V., Chyzhevskyi I. *Journal of Environmental Management*. 2021. Vol. 295. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113319> (Holiaka D. опрацьовано фахову літературу, виконано польові і лабораторні дослідження, модифіковано алгоритм розрахунку показників цифрової моделі пологу дерев, виконано статистичне опрацювання та аналіз результатів. Kato H. надано технічну допомогу в проведенні польових робіт та використанні обчислювальних потужностей. Yoschenko V. здійснено редагування драфту статті та узагальнення результатів. Onda Y. надано технічну допомогу в проведенні польових робіт та використанні обчислювальних потужностей. Igarashi Y. надано технічну допомогу в проведенні польових робіт та використанні обчислювальних потужностей. Nanba K. надано технічну допомогу в проведенні польових робіт та використанні обчислювальних потужностей. Diachuk P. взято участь у проведенні польових робіт. Holiaka M. взято участь у проведенні польових робіт. Zadorozhniuk R. взято участь у проведенні польових робіт. Kashparov V. взято участь у проведенні польових робіт. Chyzhevskyi I. організовано і погоджено експериментальні дослідження в умовах радіаційно небезпечних земель Чорнобильської зони відчуження).

5. The return of nature to the Chernobyl Exclusion Zone: Increases in forest cover of 1.5 times since the 1986 disaster / Matsala M., Bilous A., Myroniuk V., **Holiaka D.**, Schepaschenko D., See L., Kraxner F. *Forests*. 2021. Vol. 12. Issue 8. 1024. URL : <https://doi.org/10.3390/f12081024>. (Matsala M. опрацьовано фахову літературу, виконано алгоритм розрахунку показників лісової маски, здійснено статистичне опрацювання та аналіз результатів. Bilous A. визначено постановку проблеми. Myroniuk V. надано технічні консультації та виконано

валідацію отриманих результатів моделювання. *Holiaka D.* проведено валідацію і верифікацію результатів оцінювання просторового-темпорального розподілу лісових екосистем до і після пожеж у квітні 2020 року в зоні відчуження. *Scheraschenko D.* надано технічний супровід досліджень і здійснено редагування дrafту статті. *See L.* здійснено редагування фінального дrafту статті. *Kрахner F.* надано технічний супровід досліджень і здійснено редагування дrafту статті).

6. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 2. Strontium-90 transfer to culinary grains and forest woods from soils of Ivankiv district / Labunska I., Levchuk S., Kashparov V., **Holiaka D.**, Yoschenko L., Santillo D., Johnston P. *Environment International*. 2021. Vol. 146. 106282. URL : <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106282>. (*Labunska I.* визначено постановку проблеми, виконано фінальне редагування тексту статті, надано технічну допомогу в реалізації експериментальної роботи. *Kashparov V.* проаналізовано та узагальнено отримані результати. *Levchuk S.* проведено вимірювання активності ^{90}Sr в пробах ґрунту і біомаси, взято участь у здійсненні відбору проб при реалізації польових робіт і надано необхідний методичний супровід. *Holiaka D.* зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки для встановлення вмісту ^{90}Sr в стовбуровій деревині сосни звичайної і берези повислої в Іванківському адміністративному районі Київської області, створено картографічні матеріали ймовірних питомих активностей у деревині на основі узагальнених результатів статистичного аналізу. *Yoschenko L.* здійснено радіохімічне виділення ^{90}Sr у наважках проб біомаси і ґрунту. *Santillo D.* надано технічну допомогу в реалізації лабораторних робіт. *Johnston P.* надано технічну допомогу в реалізації лабораторних робіт).

7. Optimising sampling strategies for emergency response: Vegetation sampling / Yu. Khomutinin, S. Fesenko, S. Levchuk, **D. Holiaka**, V. Kashparov. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 233. 106605. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106605>. (*Khomutinin Yu.* визначено постановку проблеми дослідження, проведено польові роботи, а також статистичний аналіз результатів, узагальнено результати дослідження. *Fesenko S.* виконано редагування фінального дrafту статті. *Levchuk S.* побудовано графічні матеріали. *Holiaka D.* проведено розрахунки та виконано статистичний аналіз. *Kashparov V.* здійснено форматування структури тексту статті і їх графічного представлення відповідно до зауважень рецензентів).

8. Is there Chernobyl nuclear accident signature in Scots pine radial growth and its climate sensitivity? / M. Netsvetov, Yu. Prokopuk, **D. Holiaka**, M. Klisz, A. J. Porté, R. Puchałka, M. Romenskyu. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 878. 163132. URL : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163132>. (*Netsvetov M.* виконано постановку проблеми в дендрохронологічних і дендрометеорологічних аспектах дослідження, реалізовано методичні підходи до аналізу отриманих результатів, узагальнено результати роботи. *Prokopuk Y.* проведено збір польового матеріалу і камеральні роботи з оцінки річних приростів дерев сосни звичайної, підготовлено вихідний текст дrafту статті. *Holiaka D.* здійснено постановку проблеми в радіобіологічному напрямі досліджень, зібрано польовий

матеріал, виконано методичну модифікацію розрахунків для «відтворення» динаміки потужності поглинутих доз у повітрі деревами сосни від 6 травня 1986 р. до травня 2020 р., узагальнено отримані вихідні результати щодо поглинутих доз іонізуючого випромінювання. Klisz M. надано технічну допомогу для проведення досліджень. Porté A. J. надано технічну допомогу для проведення досліджень. Puchalka R. надано технічну допомогу для проведення досліджень. Romenskyu M. здійснено редагування фінальної версії статті).

9. Variability of activity concentrations and radial distributions of ^{137}Cs and ^{90}Sr in trunk wood of Scots pine and Silver birch / **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. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2023. Vol. 263. 107186. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107186>. (Holiaka D. здійснено постановку проблеми, польові дослідження, камеральні роботи, аналітичний огляд, обробку дослідних даних, узагальнено висновки. Yoschenko V. здійснено редагування фінального тексту статті. Cherniaiev O. R. виконано збір польового матеріалу та його камеральну обробку, а також редагування первинного тексту драфту статті. Moskaliuk A. взято участь у зборі польового матеріалу та його камеральній обробці. Lesnik O. здійснено збір польового матеріалу. Levchuk S. проведено вимірювання активності ^{137}Cs в пробах деревини. Holiaka M. здійснено камеральну обробку з гомогенізації проб деревини. Gumenuk V. виконано збір польового матеріалу. Kovbasa Y. виконано камеральні роботи. Borsuk O. проведено польові вимірювання для картування ділянок. Holik V. здійснено редагування фінального тексту статті. Nanba K. надано технічну допомогу для проведення досліджень. Kashparov V. надано технічну і методологічну допомогу для проведення досліджень).

10. Long-term changes in ^{90}Sr pools of Scots pine biomass in the Chornobyl Red Forest / Yoschenko V., Thiry Y., **Holiaka D.**, Levchuk S., Kashparov V., Nanba K. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024. 273. 107366. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107366>. (Yoschenko V. здійснено постановку проблеми і визначено концепцію дослідження, проаналізовано емпіричні дані, виконано темпоральне порівняння рівнів забруднення біомаси сосни ^{90}Sr в районі ПТЛРВ «Рудий ліс», підготовлено фінальний драфт статті. Thiry Y. виконано узагальнення результатів дослідження. Holiaka D. здійснено польові дослідження, камеральні роботи, аналітичний огляд, обробку дослідних даних. Levchuk S. реалізовано радіохімічне виділення ^{90}Sr в зразках біомаси та вимірювання його активності. Kashparov V. реалізовано методологічний і технічний супровід дослідження. Nanba K. надано технічну допомогу в проведенні експериментальних робіт).

11. Assessment of exposures to firefighters from wildfires in heavily contaminated areas of the Chornobyl Exclusion Zone / Kashparov V., Kirieiev S., Yoschenko V., Levchuk S., **Holiaka D.**, Zhurba M., Bogdan L., Vyshnevskyi D., Oughton D. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2024. 274. 107410. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2024.107410>. (Kashparov V. виконано постановку проблеми та її концептуалізацію, розраховано зовнішні та внутрішні поглинуті

доза іонізуючого випромінювання. Kirieiev S. надано емпіричні дані вимірювань вмісту техногенних радіонуклідів у повітрі навколо Чорнобильської АЕС у період досліджуваних пожеж. Yoschenko V. здійснено редагування фінальної версії тексту статті. Levchuk S. проаналізовано методичні аспекти вимірювань активності радіонуклідів у приземному шарі атмосферного повітря. Holiaka D. здійснено польові вишукувальні роботи, геопросторовий аналіз, обробку дослідних географічних даних, створено картографічні матеріали. Zhurba M. створено картографічні матеріали щодо щільностей забруднення ділянок техногенними радіонуклідами територій у межах західного сліду радіоактивних випадінь Чорнобильської АЕС. Bogdan L. проаналізовано результати щодо поглинутих доз. Vyshnevskiy D. надано фотоматеріали з БПЛА. Oughton D. здійснено редагування фінальної версії тексту статті).

12. Performance of the daily fire hazard index within territories contaminated by the Chornobyl nuclear disaster / Bogomolov V., Zibtsev S., Myroniuk V., **Holiaka D.**, Soshenskiy O., Gumeniuk V., Kalchuk Y., Budzinskiy I. Zibtseva I. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2025. 116. 105159. URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.105159>. (Bogomolov V. відтворено алгоритм і валідовано математичні моделі, виконано написання первинної та редагування фінальної версії статті. Zibtsev S. надано фінансову й адміністративну допомогу. Myroniuk V. розроблено карти горючих матеріалів, здійснено редагування фінальної версії тексту статті. Holiaka D. здійснено постановку проблеми в радіобіологічному напрямі досліджень, зібрано польовий матеріал, узагальнено отримані вихідні результати, здійснено редагування фінальної версії тексту статті. Soshenskiy O. виконано технічний супровід статті на етапах фінального редагування тексту статті. Gumeniuk V. виконано технічний супровід статті на етапах фінального редагування тексту статті. Kalchuk Y. виконано технічний супровід статті на етапах фінального редагування тексту статті. Budzinskiy I. виконано технічний супровід статті на етапах фінального редагування тексту статті. Zibtseva I. виконано технічний супровід статті на етапах фінального редагування тексту статті).

13. ^{90}Sr and ^{137}Cs distribution in Chornobyl forests: 30 years after the nuclear accident / **Holiaka D.**, Levchuk S., Kashparov V., Yoschenko V., Hurtevent P., Coppin F., Beasley J. C. *Journal of Environmental Radioactivity*, 282. 107616. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107616>. (Holiaka D. виконано постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, реалізовано розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Levchuk S. реалізовано гамма-спектрометричні вимірювання активності ^{137}Cs , а також радіохімічне виділення ^{90}Sr в зразках біомаси та вимірювання його активності. Kashparov V. надано технічну і методологічну допомогу для проведення досліджень. Yoschenko V. здійснено редагування фінальної версії тексту статті. Hurtevent P. надано попередні дані за напрямом дослідження в статті та технічні рекомендації. Coppin F. надано попередні дані за напрямом дослідження в статті та технічні рекомендації. Beasley J. C. здійснено редагування фінальної версії тексту статті).

14. Estimation of ^{90}Sr and ^{137}Cs activity concentrations in Chornobyl wood:

significance of factors and classical vs. machine learning methods / **Holiaka D.**, Igarashi Y., Yoschenko V., Zadorozhniuk R., Levchuk S., Holiaka M., Kiva O., Smith J. T., Oughton D. H., Morozova V., Lesnik O., Chyzhevskiy I., Diachuk P., Kato H., Onda Y., Kashparov V. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2026. 291. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107839>. (Holiaka D. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Igarashi Y. забезпечено виконання методичного і технічного супроводу робіт. Yoschenko V. здійснено технічний супровід та збір польового матеріалу. Zadorozhniuk R. проведено збір польового матеріалу. Levchuk S. виконано вимірювання активності питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs у зразках біомаси і ґрунту. Holiaka M. проведено збір польового матеріалу. Kiva O. проведено збір польового матеріалу. Smith J. T. надано колекцію даних про забруднення ґрунтів радіонуклідами та здійснено редагування фінальної версії тексту статті. Oughton D. H. здійснено редагування фінальної версії тексту статті. Morozova V. здійснено редагування фінальної версії тексту статті. Lesnik O. проведено збір польового матеріалу. Chyzhevskiy I. надано технічний супровід польових робіт у зоні відчуження. Diachuk P. проведено збір польового матеріалу. Kato H. надано методичний і технічний супровід робіт на різних етапах. Onda Y. надано методичний і технічний супровід робіт на різних етапах. Kashparov V. надано методичний та технічний супровід робіт на різних етапах).

Статі в інших виданнях, проіндексованих у базах даних

Web of Science Core Collection та/або Scopus

15. Розподіл вмісту ^{137}Cs у деревині стовбура сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) Житомирського Полісся після Чорнобильської аварії / **Д. М. Голяка**, С. Є. Левчук, В. П. Процак, В. О. Кашпаров. *Ядерна фізика та енергетика*. 2017. Т. 18. № 1. С. 63–71. URL : <https://doi.org/10.15407/jnpae2017.01.063>. (Голякою Д. М. визначено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Левчуком С. Є. проведено вимірювання питомої активності ^{137}Cs в зразках деревини і ґрунту. Процаком В. П. реалізовано відбір проб під час польових робіт. Кашпаровим В. О. проведено відбір проб біомаси під час польових робіт).

16. Вертикальний розподіл ^{90}Sr у ґрунтах та його накопичення в деревині сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) Чорнобильської зони відчуження / **Д. М. Голяка**, С. Є. Левчук, В. О. Кашпаров, М. А. Голяка, Л. В. Йощенко, Л. М. Отрешко, О. В. Косарчук, М. М. Лазарєв. *Ядерна фізика та енергетика*. 2020. Т. 21. № 2. С. 157–165. URL : <https://doi.org/10.15407/jnpae2020.02.157>. (Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Левчуком С. Є. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr . Кашпаровим В. О. виконано збір польових матеріалів і польові вимірювання. Голякою М. А. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Йощенко Л. В. проведено лабораторні вимірювання активності ^{90}Sr . Отрешко Л. М. проведено лабораторні

вимірювання активності ^{90}Sr . Косарчук О. В. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Лазарєвим М. М. проведено збір польових матеріалів і польові вимірювання).

17. Вміст ^{90}Sr та ^{137}Cs в депо і біогенних потоках типових насаджень Чорнобильської зони відчуження / Д. М. Голяка, С. Є. Левчук, В. І. Йощенко, В. О. Кашпаров, Л. В. Йощенко, М. А. Голяка, В. В. Павлюченко, П. П. Дячук, Р. М. Задорожнюк, В. С. Морозова. *Ядерна фізика та енергетика*. 2020. Т. 21. № 3. Р. 256–264. URL : <https://doi.org/10.15407/jnpae2020.03.256>. (Голякою Д. М. проаналізовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Левчуком С. Є. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr . Йощенком В. І. проведено редагування вихідного дrafту статті. Кашпаровим В. О. проведено редагування вихідного дrafту статті. Йощенко Л. В. здійснено радіохімічне виділення ^{90}Sr у наважках проб біомаси, води і ґрунту. Голякою М. А. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Павлюченко В. В. здійснено вимірювання активності у пробах ^{137}Cs . Дячуком П. П. виконано збір польових матеріалів і польові вимірювання. Задорожнюк Р. М. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Морозовою В. С. проведено камеральні роботи з підготовки проб до спектрометричних вимірювань).

18. Estimation of ^{90}Sr content in Scots pine timber based on measurement of beta particle flux density from the surface of the trunk bark / D. M. Holiaka, S. E. Levchuk, Ya. A. Savytska, O. M. Lesnik, V. V. Gumeniuk, V. S. Morozova, Yu. S. Prokopuk, O. V. Kashparova. *Ukrainian journal of forest and wood science*. 2021. Vol. 12. Issue 1. С. 48–56. URL : <http://dx.doi.org/10.31548/forest2021.01.006>. (Holiaka D. M. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Levchuk S. E. виконано калібрування бета-спектрометра для вимірювання в пробах ^{90}Sr і проведено самі вимірювання активності у відібраних польових матеріалах. Savytska Ya. A. здійснено збір польового матеріалу на експериментальних майданчиках. Lesnik O. M. здійснено збір польового матеріалу на експериментальних майданчиках. Gumeniuk V. V. здійснено збір польового матеріалу на експериментальних майданчиках. Morozova V. S. відредаговано фінальний текст статті. Prokopuk Yu. S. здійснено форматування графічного матеріалу. Kashparova O. V. проведено польові дослідження на радіоактивно забруднених землях).

19. Зонування територій радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії / В. О. Кашпаров, Д. М. Голяка, С. Є. Левчук, В. Б. Берковський. *Ядерна фізика та енергетика*. 2022. Т. 23. № 3. Р. 182–194. URL : <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.03.182>. (Kashparov V. O. здійснено постановку проблеми, виконано ретроспективний аналіз попередніх досліджень і чинного законодавства, а також сформовано узагальнення. Holiaka D. M. проведено розрахунки, проаналізовано характер просторового розподілу Чорнобильських радіонуклідів у зоні відчуження, виконано геостатистичний аналіз, створено картографічні матеріали. Levchuk S. E. представлено

результати окремих вимірювань радіонуклідів. *Berkovsky V. B.* виконано редагування фінальної версії статті).

20. Hulak O., **Holiaka D.** Legal principles of forest fire protection on radiation hazardous lands of Ukraine in modern conditions. *Law. Human. Environment.* 2024. Vol. 5. Issue 2. P. 9–27. URL : <https://doi.org/10.31548/law/2.2024.09> (*Hulak O. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, проаналізовано та узагальнено отримані результати. Holiaka D. опрацьовано фахову літературу, виконано редагування фінального документа*).

21. ^{137}Cs release from combustible materials burning under different environmental conditions in the Chornobyl Exclusion Zone / **D. M. Holiaka**, S. E. Levchuk, M. O. Hrechaniuk, V. V. Illienko, M. A. Holiaka, V. P. Protsak, V. O. Kashparov. *Nuclear Physics and Atomic Energy.* 2026. Vol. 27. Issue 1. P. 70–79. URL : <https://doi.org/10.15407/jnpae2026.01.070>. (*Holiaka D. M. виконано постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено камеральні і лабораторні роботи, здійснено розрахунки та проаналізовано та узагальнено отримані результати. Levchuk S. E. проведено вимірювання ^{137}Cs . Hrechaniuk M. O. проведено пожежні експерименти. Illienko V. V. виконано пожежні експерименти. Holiaka M. A. проведено пожежні експерименти. Protsak V. P. забезпечено методологічний супровід. Kashparov V. O. забезпечено методологічний супровід*).

Статті в наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

22. **Голяка Д. М.** Формування середнього зразка й оцінювання фітомаси компонентів стовбура дерев сосни звичайної для визначення вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs . *Науковий вісник НЛТУ України.* 2017. Т. 27. № 6. С. 20–24. URL: <https://doi.org/10.15421/40270603>.

23. Динаміка опадів та дощових вод у радіоактивно забруднених соснових деревостанах / **Д. М. Голяка**, В. О. Кашпаров, С. Є. Левчук, В. П. Процак, М. М. Лазарєв, В. В. Павлюченко, М. А. Голяка, Л. В. Йощенко. *Науковий вісник НЛТУ України.* 2017. Т. 27. № 10. С. 77–80. URL : <https://doi.org/10.15421/40271013>. (*Голякою Д. М. зібрано польовий матеріал, виконано розрахунки, оцінено низхідні потоки в досліджуваному насадженні, сформульовано висновки. Кашпаровим В. О. здійснено методичний супровід польових робіт, виконано збір польових матеріалів і польові вимірювання. Левчуком С. Є. проведено калібрування приладів для проведення лабораторних спектрометричних вимірювань ізотопів. Процаком В. П. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Лазарєвим М. М. проведено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Павлюченко В. В. проведено вимірювання активності ^{137}Cs в пробах біомаси і метеорологічних вод. Голякою М. А. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Йощенко Л. В. проведено вимірювання активності ^{90}Sr в пробах біомаси і метеорологічних вод*).

24. Ідентифікація та оцінка висот дерев сосни звичайної у насадженнях Чорнобильської зони відчуження стереофотограмметричним способом / **Д. М. Голяка**, Х. Като, В. І. Йощенко, Я. Ігараші, Ю. Онда, О. О. Аврамчук,

М. А. Голяка, В. В. Гуменюк, О. М. Лесник. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т. 28. № 10. С. 18–21. URL : <https://doi.org/10.15421/40281003>. (Голякою Д. М. опрацьовано фахову літературу, виконано польові дослідження, статистичне опрацювання, проаналізовано та узагальнено результати. Като Х. виконано оцінку та обробку результатів фотостереограмметричних зображень з квадрокоптера. Йоценком В. І. здійснено надання технічної допомоги з обслуговування квадрокоптера й організовано проведення досліджень у місцях з обмеженим доступом. Ігараші Я. здійснено супровід надання технічної допомоги з обслуговування квадрокоптера. Ондою Ю. реалізовано забезпечення і надано технічну допомогу з обслуговування квадрокоптера. Аврамчук О. О. взято участь у проведенні польових робіт і вимірювань. Голякою М. А. взято участь у проведенні польових робіт і вимірювань. Гуменюком В. В. взято участь у проведенні польових робіт і вимірювань. Лесником О. М. взято участь у проведенні польових робіт і вимірювань).

25. Аналіз проблем та оцінка перспектив використання паливної деревини, отриманої на територіях, забруднених внаслідок аварії на ЧАЕС / Л. М. Отрешко, Л. В. Йоценко, **Д. М. Голяка**, С. В. Поліщук, О. В. Косарчук, М. М. Лазарєв, С. М. Грисюк. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11. № 5–6. URL : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/view/13438>. (Отрешко Л. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та виконано узагальнення отриманих результатів. Йоценко Л. В. здійснено збір польового матеріалу та проведено вимірювання активності ^{90}Sr у польових пробах. Голякою Д. М. виконано польові дослідження та забезпечено методичний супровід розрахунків вихідних результатів публікації. Поліщуком С. В. проведено відбір польового матеріалу. Косарчук О. В. проведено відбір польового матеріалу. Лазарєвим М. М. проведено анкетування місцевого населення, відібрано проби попелу. Грисюком С. М. здійснено редагування кінцевого дrafту статті).

26. Модель біогенних потоків і депо ^{90}Sr у забруднених соснових насадженнях / **Д. М. Голяка**, С. Є. Левчук, В. І. Йоценко, Л. В. Йоценко, М. А. Голяка. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29. № 9. С. 81–86. URL : <https://doi.org/10.36930/40290914>. (Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Левчуком С. Є. проведено калібрування вимірювальних радіометричних приладів і проведено збір польових матеріалів. Йоценком В. І. надано технічну допомогу в проведенні польових робіт, вичитано дrafт статті. Йоценко Л. В. здійснено вимірювання радіохімічним способом активності ^{90}Sr у відібраних пробах. Голякою М. А. виконано відбір проб ґрунту і підстилки на експериментальному майданчику).

Стаття в спеціалізованому науковому виданні

27. Розподіл питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs в деревному стовбурі сосни звичайної у ближній зоні випадінь ЧАЕС / **Д. М. Голяка**, В. О. Кашпаров, С. Є. Левчук, В. П. Процак, Л. В. Йоценко. *Проблеми Чорнобильської зони відчуження*. 2018. Вип. 19. С. 33–45. (Голякою Д. М. здійснено постановку

проблеми, проаналізовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та виконано статистичний аналіз і узагальнення отриманих результатів. Кашипаровим В. О. здійснено редагування фінального тексту статті. Левчуком С. Є. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs . Процаком В. П. взято участь у зборі польового матеріалу. Йоценко Л. В. проведено лабораторні вимірювання активності ^{90}Sr).

Розділ монографії

28. Розподіл активності ^{137}Cs і ^{90}Sr у ґрунті та їх депонування стовбурною деревиною у лісах Чорнобильської зони відчуження / **Д. М. Голяка**, С. В. Поліщук, С. Є. Левчук, О. М. Леснік, Р. М. Задорожнюк, П. П. Дячук, М. А. Голяка, Я. В. Ковбаса. Вчені НУБіП у вивченні та мінімізації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС : монографія. Київ, 2021. С. 53–68. URL : https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u243/47_vcheni_nubip_monografiya_zagalniy_2_021.pdf. (Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Поліщуком С. В. здійснено збір польових матеріалів. Левчуком С. Є. здійснено спектрометричні вимірювання активності ^{137}Cs в зразках. Лесніком О. М. здійснено збір польових матеріалів. Задорожнюком Р. М. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Дячуком П. П. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Голякою М. А. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Ковбасою Я. В. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

Тези наукових доповідей на конференціях та симпозіумах

29. **Голяка Д. М.**, Процак В. П. Лінійна щільність компонентів кори стовбура дерев сосни звичайної. Актуальні проблеми лісового сектору та садово-паркового господарства : міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 14–15 квітня 2016 року : тези доповіді. Київ, 2016. С. 28–29. (Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, обґрунтовано модифікацію методичних підходів, проаналізовано та узагальнено отримані результати. Процаком В. П. взято участь у проведенні польових робіт з вимірювання показників деревостанів).

30. Миронюк В. В., Білоус А. М., **Голяка Д. М.** Оцінювання фітомаси лісів за даними дистанційного зондування Землі. 16-та українська конференція з космічних досліджень : наукова конференція, м. Одеса, 22–27 серпня 2016 року : тези доповіді. Одеса, 2016. С. 187. (Миронюком В. В. проведено непряме оцінювання запасів біомаси деревостанів з використанням спектральних властивостей супутникової зйомки в оптичному діапазоні електромагнітних хвиль. Білоусом А. М. здійснено постановку проблеми, виконано польові роботи і оцінювання компонентів біомаси. Голякою Д. М. зібрано польовий матеріал та проведено первинні розрахунки з оцінювання лісотаксаційних показників і запасів біомаси).

31. Радіальний розподіл ^{137}Cs у стовбуровій деревині сосни звичайної Житомирського Полісся / **Д. М. Голяка**, В. П. Процак, С. Є. Левчук, В. В. Павлюченко. Сільськогосподарська та лісова радіологія – 30 років після Чорнобиля : міжнародна наукова конференція, м. Київ, 3 червня 2016 року : тези доповіді. Київ, 2016. С. 8. (Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Процаком В. П. виконано збір польових матеріалів і польові вимірювання. Левчуком С. Є. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr).

32. Річна динаміка опадів соснових деревостанів / **Д. М. Голяка**, В. О. Кашпаров, С. Є. Левчук, В. П. Процак. Здоров'я лісів, екосистемні послуги та лісові продукти для суспільства : міжнародна наукова конференція, 6–7 квітня 2017 року : тези доповіді. Київ, 2017. С. 63–64. (Голякою Д. М. здійснено польові дослідження, камеральні роботи, аналітичний огляд, обробку дослідних даних. Кашпаровим В. О. виконано методичний супровід польових робіт, виконано збір польових матеріалів і польові вимірювання. Левчуком С. Є. проведено лабораторні спектрометричні вимірювання ізотопів. Процаком В. П. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання).

33. Радіальний приріст стовбурів сосни звичайної в умовах високих рівнів іонізуючих випромінювань після аварії на Чорнобильській АЕС / **Д. М. Голяка**, В. О. Кашпаров, С. Є. Левчук, В. П. Процак, М. А. Голяка. Ліси Східної Європи у світі, що змінюється : міжнародна наукова конференція, м. Київ, 27–30 вересня 2017 року : тези доповіді. Київ, 2017. С. 44–45. (Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, польові дослідження, камеральні роботи, аналітичний огляд, обробку дослідних даних, узагальнено висновки. Кашпаровим В. О. розраховано поглинуті дози іонізуючого випромінювання на ділянках з різними рівнями ураження дерев сосни звичайної. Процаком В. П. взято участь у зборі польового матеріалу. Левчуком С. Є. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr . Голякою М. А. реалізовано камеральні вимірювання річних приростів дерев сосни звичайної).

34. Monitoring of contaminated forests from early post-accident phase to long term, an unavoidable tool to assess RNs cycling in forests / F. Coppin, P. Hurtevent, M.-A. Gonze, P. Calmon, C. Simonucci, **D. Holiaka**, S. Levchuk, V. Protsak, V. Khashparov, K. Namba, H. Kato Y. Onda. ERPW Session 09 ICRP and ERPW, Paris, 10–20 October 2017 : thesis. Paris, France, 2017. P. 62. URL : <http://www.icrp-erpw2017.com/en/programme/18>. (Coppin F. виконано польові, камеральні і лабораторні роботи, здійснено методичний і технічний супровід польових і лабораторних вимірювань для показників ґрунту на лісових ділянках. Hurtevent P. виконано польові, камеральні і лабораторні роботи, здійснено методичний і технічний супровід польових і лабораторних вимірювань для показників біомаси на лісових ділянках. Gonze M.-A. реалізовано фінансовий і матеріальний супровід дослідження. Calmon P. параметризовано моделі біогеохімічних потоків ізотопів у деревостанах. Simonucci C. виконано польові, камеральні і лабораторні роботи, здійснено методичний і технічний супровід польових і лабораторних вимірювань. Holiaka D. здійснено польові дослідження, камеральні роботи, аналітичний огляд,

обробку дослідних даних і узагальнено результати вимірювань. *Levchuk S.* проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr , а також вимірювання низки показників ґрунтів. *Protsak V.* здійснено польові, камеральні і лабораторні роботи, проведено лізиметричні вимірювання. *Khashparov V.* виконано польові, камеральні і лабораторні роботи, здійснено загальний методичний і технічний супровід польових і лабораторних вимірювань. *Namba K.* здійснено загальний технічний супровід польових і лабораторних вимірювань. *Kato H.* здійснено методичний і технічний супровід польових і лабораторних вимірювань. *Onda Y.* здійснено загальний методичний і технічний супровід польових і лабораторних вимірювань).

35. **Голяка Д. М.** Розподіл питомої активності ^{90}Sr у стовбурній деревині сосни звичайної у ближній зоні випадінь ЧАЕС / **Д. М. Голяка**, В. О. Кашпаров, С. Є. Левчук, В. П. Процак, Л. В. Йощенко. XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 16–20 квітня 2018 року : тези доповіді. Київ, 2018. С. 212. (Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проаналізовано й узагальнено отримані результати. Кашпаровим В. О. підготовлено документацію для проведення роботи на ділянках, які належать до радіаційно небезпечних земель, взято участь у зборі польового матеріалу. Левчуком С. Є. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs у відібраних пробах. Процаком В. П. взято участь у зборі польового матеріалу та підготовці польового і лабораторного обладнання. Йощенко Л. В. проведено лабораторні вимірювання активності ^{90}Sr у відібраних пробах).

36. Обґрунтування можливості використання радіоактивно забрудненої після Чорнобильської аварії паливної деревини / Л. М. Отрешко, Л. В. Йощенко, **Д. М. Голяка**, О. В. Косарчук. XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України, м. Київ, 16–20 квітня 2018 року : тези доповіді. Київ, 2018. С. 222. (Отрешко Л. М. здійснено постановку проблеми, зібрано польовий матеріал, розраховано коефіцієнти переходу для радіонуклідів. Йощенко Л. В. проведено камеральні роботи і лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr . Голякою Д. М. зібрано польовий матеріал і проаналізовано результати. Косарчук О. В. здійснено польові роботи).

37. Біогенні потоки ^{90}Sr у соснових насадженнях / **Д. М. Голяка**, В. О. Кашпаров, Л. В. Йощенко, С. Є. Левчук, В. П. Процак. Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: виклики для університетів наук про життя : міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–25 травня 2018 року : тези доповіді. Т. 2. Київ, 2018. С. 28–30. (Голякою Д. М. опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проаналізовано та узагальнено отримані результати. Кашпаровим В. О. здійснено методичний супровід польової частини досліджень. Йощенко Л. В. проведено лабораторні вимірювання активності ^{90}Sr , Левчуком С. Є. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs у пробах ґрунту. Процаком В. П. виконано збір польових матеріалів і польові вимірювання).

38. Identification and estimation of heights of the Scots pine trees in the Chernobyl exclusion zone using stereophotogrammetry method / **D. Holiaka**, H. Kato, V. Yoschenko, Y. Igarashi, Y. Onda, M. Holiaka, V. Humenyuk, O. Lesnyk, P.

Diachuk, R. Zadorozhniuk. Проблеми розвитку лісової таксації, лісовпорядкування та інвентаризації лісів : міжнародна науково-практична конференція, 6–7 грудня 2018 року : тези доповіді. Київ, 2018. С. 21–22. (*Holiaka D. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проаналізовано та узагальнено отримані результати. Kato H. проведено оцінку результатів фотостереограмметричної обробки зображень з квадрокоптера. Yoschenko V. здійснено надання технічної допомоги з обслуговування квадрокоптера і організовано проведення досліджень у місцях з обмеженим доступом. Igarashi Y. здійснено супровід надання технічної допомоги з обслуговування квадрокоптера. Onda Y. надано технічну допомогу з обслуговування квадрокоптера. Holiaka M. взято участь у польових роботах. Нитенуик V. взято участь у польових роботах. Lesnyuk O. взято участь у польових роботах. Diachuk P. взято участь у польових роботах. Zadorozhniuk R. взято участь у польових роботах*).

39. Content of ^{90}Sr in live biomass compartments within forests of Ukrainian Polissya. **D. Holiaka**, M. Matsala, L. Otreshko, A. Bilous. Проблеми розвитку лісової таксації, лісовпорядкування та інвентаризації лісів : міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 6–7 грудня 2018 року : тези доповіді. Київ, 2018. С. 23. (*Holiaka D. зібрано польовий матеріал, проаналізовано та узагальнено отримані результати. Matsala M. виконано розрахунки для описових статистик, підготовлено картографічні й інші графічні матеріали, проведено первинне редагування тексту тез доповіді. Otreshko L. розраховано коефіцієнти переходу для ^{90}Sr і ^{137}Cs результати власних експериментальних робіт. Bilous A. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, виконано узагальнення отриманих вихідних результатів*).

40. Distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity concentration in stem wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) tree near Chernobyl nuclear power plant / **D. M. Holiaka**, V. I. Yoschenko, S. E. Levchuk, L. V. Yoschenko, V. O. Kashparov. Annual Scientific Conference, Kyiv, National Academy of Sciences of Ukraine, 8–12 April, 2019 : thesis. Institute for Nuclear Research. Kyiv, 2019. URL: http://www.kinr.kiev.ua/kinr-2019/re_holiaka.html. (*Holiaka D. M. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, виконано камеральні роботи, проаналізовано та узагальнено отримані результати. Yoschenko V. I. здійснено редагування фінального тексту тез доповідей. Levchuk S. E. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs . Yoschenko L. V. проведено лабораторні вимірювання активності ^{90}Sr . Kashparov V. O. взято участь у зборі польового матеріалу*).

41. Radiological situation in forests of Ukraine on late phase of the Chernobyl disaster / **D. Holiaka**, V. Kashparov, S. Levchuk, S. Zibtsev. XXV IUFRO World Congress, Curitiba, PR, Brazil, 29 Sept - 5 October 2019 : thesis. Curitiba, 2019. P. 653. URL : http://iufro2019.com/wp-content/uploads/2019/10/Anais_Iufro_Final_reduzido-1.pdf. (*Holiaka D. опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал і проаналізовано отримані результати. Kashparov V. проведено узагальнення отриманих результатів. Levchuk S. здійснено калібрування радіометричних*

приладів і обладнання та виконано вимірювання активностей радіонуклідів. Zibtsev S. систематизовано отримані результати).

42. Estimation of biomass and stocks biologically mobility radionuclides using methods of processing aboveground and remote sensing data for radioactively contaminated forests in Ukraine / **D. Holiaka**, H. Kato, V. Yoschenko, Y. Onda, Y. Igarashi, K. Nanba, P. Dyachuk, R. Zadorozhnik. Center for Research in Isotopes and Environmental Dynamics. Fukushima university. Conference ERAN2019. Web Flash Talk Program, Japan, March 11th, 2020 : thesis. URL : <http://www.ied.tsukuba.ac.jp/ernc/wp-content/uploads/2020/06/%E8%8B%A5%E6%89%8B%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B82.pdf>. (Holiaka D. *опрацьовано фахову літературу, виконано польові і лабораторні дослідження, модифіковано алгоритм розрахунку показників цифрової моделі пологу дерев, здійснено статистичне опрацювання та проаналізовано результати. Kato H. надано технічну допомогу в проведенні польових робіт та використанні обчислювальних потужностей. Yoschenko V. здійснено узагальнення результатів. Onda Y. надано технічну допомогу в проведенні польових робіт та використанні обчислювальних потужностей. Igarashi Y. надано методичну допомогу в проведенні польових робіт. Nanba K. надано технічну допомогу в проведенні польових робіт. Dyachuk P. взято участь у проведенні польових робіт. Zadorozhnik R. взято участь у проведенні польових робіт*).

43. Variation and radial distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr activity concentrations in trunk wood of Scot pine and Silver birch trees: abstracts / **Holiaka D.**, Yoschenko V., Cherniaiev O.-R., Moskaliuk A., Lesnik O., Levchuk S., Holiaka M., Kovbasa Y. Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University (IER). Fukushima 10 years: Forests, River, Ocean, and Food – Remaining issues for restoration: international symposium, October 11-12, 2021 : thesis. 2021. P. 30. URL : <https://www.ier-f.com/wp-content/themes/ezhp/img/abstract.pdf>. (Holiaka D. *опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, виконано камеральні роботи і проаналізовано та узагальнено отримані результати. Yoschenko V. здійснено редагування фінального тексту тез доповіді. Cherniaiev O. R. виконано збір польового матеріалу та його камеральну обробку, а також редагування первинного тексту драфту статті. Moskaliuk A. взято участь у зборі польового матеріалу та його камеральній обробці. Lesnik O. здійснено збір польового матеріалу. Levchuk S. проведено вимірювання активності ^{137}Cs у пробах деревини. Holiaka M. здійснено камеральну обробку з гомогенізації проб деревини. Kovbasa Y. виконано камеральні роботи*).

44. Точність дешифрування дерев сосни звичайної за даними зйомки з БПЛА / Р. М. Задорожнюк, **Д. М. Голяка**, О. М. Леснік, П. П. Дячук, А. М. Білоус. Актуальні проблеми дослідження лісових та урбоєкосистем України в умовах воєнного стану: міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23 листопада 2023 року : тези доповіді. Київ, 2023. С. 38–39. (Задорожнюком Р. М. зібрано польовий матеріал, підібрано методичні підходи, проведено розрахунки. Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, взято участь у проведенні польових робіт і вимірюваннях, перевірено вихідні результати непрямих вимірювань. Лесніком О. М. взято участь у проведенні польових робіт і

вимірюваннях. Дячуком П. П. взято участь у проведенні польових робіт і вимірюваннях. Білоусом А. М. здійснено редагування фінальної версії тексту тез доповіді).

45. Combined remote sensing and modelling of the state of Chornobyl forests in terms of productivity, radioactive contamination, and economic use: abstracts / **D. Holiaka**, V. Morozova, R. Zadorozhniuk, V. Yoschenko, S. Levchuk, J. T. Smith, N. A. Beresford, O. Kiva, H. C. Tyldum, D. H. Oughton, M. Holiaka, I. Yasunori, O.-R. Cherniaiev, O. Lesnik, I. Chyzhevskiy, K. Hiroaki, P. Diachuk, N. Kenji, O. Yuichi, V. Kashparov. The 10th Annual Symposium of the Institute of Environmental Radioactivity, Fukushima University, February 28-29, 2024 : thesis. 2024. P. 41. URL: https://www.ier.fukushima-u.ac.jp/wp-content/uploads/2024/02/the-10th-annual-symposium_abstracts.pdf. (Holiaka D. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, обґрунтовано методичні підходи, проведено розрахунки, проаналізовано та узагальнено отримані результати, розроблено комплексний інтегрований алгоритм просторово-темпоральної оцінки радіологічних, екологічних і таксаційних показників насаджень лісового фонду української частини зони відчуження, створено картографічні матеріали. Morozova V. відредаговано текст фінальної версії тез. Zadorozhniuk R. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання, реалізовано картування за допомогою квадрокоптерів. Yoschenko V. забезпечено технічну допомогу в реалізації досліджень. Levchuk S. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr . Smith J. T. надано набори даних про рівні забруднення окремих ділянок лісів. Beresford N. A. надано набори даних про рівні забруднення окремих ділянок лісів. Kiva O. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Tyldum H. C. організовано матеріальне забезпечення для продовження обчислювальних робіт. Oughton D. H. відредаговано текст фінальної версії тез. Holiaka M. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Yasunori I. надано технічну допомогу в реалізації польових досліджень і фотостереограмметричних обчислень. Cherniaiev O.-R. виконано збір польових матеріалів і польові вимірювання. Lesnik O. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Chyzhevskiy I. оформлено дозволи на проведення польотів і фотозйомки біля забороненої зони для польотів навколо Чорнобильської АЕС, із використанням квадрокоптера. Hiroaki K. надано технічну допомогу в реалізації досліджень. Diachuk P. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Kenji N. передано технічну допомогу в реалізації досліджень. Yuich O. надано технічну допомогу в реалізації досліджень. Kashparov V. здійснено методичний супровід і перевірку польових робіт і розрахунків).

46. Biogeochemical recycling of K and Cs isotopes in deciduous forest stands on the long term after deposition / P. Hurtevent, F. Coppin, M.-A. Gonze, Ph. Calmon, D. Okhrimchuk, Y. Onda, H. Kato, K. Nanba, **D. Holiaka**, S. Levchuk, V. Protsak, V. Kashparov, Y. Thiry. The 26th IUFRO World Congress in Stockholm, Sweden (June 23–29, 2024): thesis. 2024. P. 1121 URL: <https://iufro2024.com/wp-content/uploads/iufro2024abstracts.pdf> (Hurtevent P. забезпечено методологічний супровід для оцінювання показників біомаси. Coppin F. підтримано

методологічний супровід для оцінювання показників ґрунту. Gonze M.-A. здійснено адміністрування фінансового забезпечення. Calmon Ph. здійснено адміністрування технологічного забезпечення. Okhrimchuk D. проаналізовано вихідні дані вимірювань. Onda Y. забезпечено методологічний супровід. Kato H. виконано польові, камеральні та лабораторні роботи. Nanba K. адміністративний супровід досліджень. Holiaka D. проведено польові роботи і вимірювання біомаси, перевірено вихідні дані вимірювань. Levchuk S. проведено польові і лабораторні вимірювання. Protsak V. зібрано польовий матеріал. Kashparov V. забезпечено методологічний супровід. Thiry Y. здійснено методологічний супровід і постановку проблеми).

47. Sensitivity to gamma radiation of Scots pine seedlings grown from seeds developed under elevated levels of ionising radiation / J. E. Olsen, P. Bhattacharjee, Y. K. Lee, P. Pavlenko, **D. Holiaka**, O. Ch. Lind, D. A. Brede, V. Kashparov, B. Salbu. The 26th IUFRO World Congress in Stockholm, Sweden (23–29 June 2024). 2024. P. 1138. URL : <https://iufro2024.com/wp-content/uploads/iufro2024abstracts.pdf>. (Olsen J. E. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Bhattacharjee P. імплементовано експериментальну роботу. Lee Y. K. проаналізовано дані вимірювань. Pavlenko P. зібрано польовий матеріал і проведено вимірювання активності радіонуклідів. Holiaka D. проведено польові роботи і вимірювання, здійснено розрахунки. Lind O. Ch. здійснено адміністрування робіт. Brede D. A. проаналізовано та узагальнено отримані результати. Kashparov V. організовано матеріально-технічне забезпечення польових робіт. Salbu B. проаналізовано й узагальнено отримані результати).

48. Contribution of FirEUriSk project to risk assessment and prevention of forest fires in the Chernobyl Exclusion Zone / O. Soshenskii, D. Viegas, V. Myroniuk, **D. Holiaka**, V. Kashparov, S. Sydorenko, V. Bogomolov, O. Borsuk. The 26th IUFRO World Congress in Stockholm, Sweden (23–29 June 2024). 2024. P. 3008 URL : <https://iufro2024.com/wp-content/uploads/iufro2024abstracts.pdf>. (Soshenskii O. забезпечено адміністрування дослідження. Viegas D. виконано фінансовий супровід робіт. Myroniuk V. розроблено карти паливних матеріалів. Holiaka D. опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проаналізовано й узагальнено отримані результати. Kashparov V. надано консультації щодо радіологічної складової робіт. Sydorenko S. адаптовано іноземні підходи під реалії експериментальних робіт для місцевих умов. Bogomolov V. проаналізовано й узагальнено отримані результати. Borsuk O. виконано адміністрування польових робіт).

49. IAEA-coordinated research advances methods and data for radiation dosimetry of animals and plants / A. Ulanowski, T. Hinton, J. Beasley, M. Bonzom, S. Cao, S. Frelon, **D. Holiaka**, M.P. Johansen, M. Karimipourfard, V. Kashparov, M. Kudzin, O.C. Lind, Y. Onda, S. Sina, H. Suseno, M. Suzuki, T. Weerakkody. The 16th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA). Orlando, USA. (7-12 July 2024). 2024. URL : <https://www.irpa.net/members/PDF%20Program%20IRPA16.pdf>. (Ulanowski A. здійснено адміністрування проєкту. Hinton T. визначено цілі досліджень.

Beasley J. забезпечено технічну можливість публікації. Bonzot M. зібрано і надано підготовлені експериментальні дані. Cao S. зібрано і надано підготовлені експериментальні дані. Frelon S. проведено польові роботи. Holiaka D. опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, виконано камеральні роботи, проаналізовано та узагальнено отримані результати. Johansen M. P. проведено польові роботи. Karimipourfard M. отримано експериментальні дані. Kashparov V. встановлено трекери для запису переміщення риб. Kudzin M. зібрано і надано підготовлені експериментальні дані. Lind O. C. оброблено дані просторових записів щодо переміщення риб. Onda Y. зібрано і надано підготовлені експериментальні дані. Sina S. проведено польові роботи. Suseno H. зібрано і надано підготовлені експериментальні дані. Suzuki M. зібрано і надано підготовлені експериментальні дані. Weerakkody T. проведено польові роботи).

50. ^{90}Sr and ^{137}Cs distribution in Chornobyl forests : 30 years after the nuclear accident : abstracts / **D. Holiaka**, S. Levchuk, V. Kashparov, V. Yoschenko, P. Hurtevent, F. Coppin, J. C. Beasley. The 11th Annual Symposium of the IER, Fukushima University (March 10-11, 2025). 2025. P.43. URL: https://www.ier.fukushima-u.ac.jp/wp-content/uploads/2025/02/the-11th-annual-symposium_abstracts.pdf. *(Holiaka D. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, виконано камеральні роботи, проаналізовано й узагальнено отримані результати. Levchuk S. реалізовано гамма-спектрометричні вимірювання активності ^{137}Cs , а також радіохімічне виділення ^{90}Sr у зразках біомаси та вимірювання його активності. Kashparov V. надано технічну і методологічну допомогу для проведення досліджень Yoschenko V. здійснено редагування фінальної версії тексту статті. Hurtevent P. надано попередні дані за напрямом дослідження в статті та технічні рекомендації. Coppin F. надано попередні дані за напрямом дослідження в статті та технічні рекомендації. Beasley J. C. здійснено редагування фінальної версії тексту статті).*

Авторські свідоцтва

51. Наукова стаття «Вертикальний розподіл ^{90}Sr у ґрунтах та його накопичення в деревині сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) Чорнобильської зони відчуження» : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір / **Д. М. Голяка**, С. Є. Левчук, В. О. Кашпаров, М. А. Голяка, Л. В. Йощенко, Л. М. Отрешко, О. В. Косарчук, М. М. Лазарєв. (Україна). № 100881; дата реєстрації 21.12.2020. *(Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Левчуком С. Є. проведено лабораторні вимірювання активності ^{137}Cs і ^{90}Sr . Кашпаровим В. О. виконано збір польових матеріалів і польові вимірювання. Голякою М. А. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Йощенко Л. В. проведено лабораторні вимірювання активності ^{90}Sr . Отрешко Л. М. проведено лабораторні вимірювання активності ^{90}Sr . Косарчук О. В. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Лазарєвим М. М. виконано збір польових матеріалів і польові вимірювання).*

52. Наукова стаття «Розподіл активності ^{137}Cs і ^{90}Sr у ґрунті та їх депонування стовбурною деревиною у лісах Чорнобильської зони відчуження»: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір / **Д. М. Голяка**, С. В. Поліщук, С. Є. Левчук, О. М. Леснік, Р. М. Задорожнюк, П. П. Дячук, М. А. Голяка, Я. В. Ковбаса. (Україна). № 107863; дата реєстрації 08.09.2021. (Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Поліщуком С. В. здійснено збір польових матеріалів. Левчуком С. Є. здійснено спектрометричні вимірювання активності ^{137}Cs в зразках. Лесніком О. М. здійснено збір польових матеріалів. Задорожнюком Р. М. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Дячуком П. П. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Голякою М. А. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання. Ковбасою Я. В. здійснено збір польових матеріалів і польові вимірювання).

53. Наукова стаття «Оцінка вмісту ^{90}Sr у деревині сосни звичайної на основі вимірювання щільності потоку бета-частинок з поверхні кори стовбура»: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір / **Д. М. Голяка**, С. Є. Левчук, Я. А. Савицька, О. М. Леснік, В. В. Гуменюк, В. С. Морозова, Ю. С. Прокопук, О. В. Кашпарова. (Україна). № 107864; дата реєстрації 08.09.2021. (Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки та проаналізовано й узагальнено отримані результати. Левчуком С. Є. виконано калібрування бета-спектрометра для вимірювання у пробах ^{90}Sr і проведено самі вимірювання активності у відібраних польових матеріалах. Савицькою Я. А. здійснено збір польового матеріалу на експериментальних майданчиках. Лесніком О. М. здійснено збір польового матеріалу на експериментальних майданчиках. Гуменюком В. В. здійснено збір польового матеріалу на експериментальних майданчиках. Морозовою В. С. відредаговано фінальний текст статті. Прокопук Ю. С. здійснено форматування графічного матеріалу. Кашпаровою О. В. забезпечено організацію польових досліджень на радіоактивно забруднених землях).

54. **Голяка Д. М.** Комп'ютерна програма «Тренування та валідації XGBoost метаалгоритму для оцінювання забруднення деревини лісів Чорнобильської зони відчуження»: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. (Україна). № 138870; дата реєстрації 21.08.2025. (Ідентифікатор електронного документа CR0549210825 на <https://sis.nipo.gov.ua>).

55. **Голяка Д. М.** Комп'ютерна програма «Комплекс оцінювання/прогнозування показників дерев'янистих екосистем у зоні відчуження навколо Чорнобильської АЕС»: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. (Україна). № 138872; дата реєстрації 21.08.2025. (Ідентифікатор електронного документа CR0570210825 на <https://sis.nipo.gov.ua>).

Науково-методичні рекомендації та матеріали

56. Нормативно-інформаційне забезпечення для прогнозу росту деревостанів та оцінювання рослинної біомаси лісів Українського Полісся: науково-методичні

рекомендації / А. М. Білоус, А. Ю. Терентьєв, В. М. Володимиренко, **Д. М. Голяка**, О. О. Аврамчук, Я. В. Ковбаса, М. А. Бузиль, У. М. Котляревська, О. І. Слива. Київ : Компринт, 2015. 71 с. (*Білоусом А. М. здійснено постановку проблеми та розроблено більшість моделей і нормативно-довідкових таблиць показників деревостанів. Терентьєвим А. Ю. проведено параметризацію ростових моделей деревостанів. Володимиренко В. М. виконано валідацію моделей біопродуктивності деревостанів. Голякою Д. М. зібрано польовий матеріал і проведено первинні розрахунки з оцінювання лісотаксаційних показників і запасів біомаси. Аврамчуком О. О. зібрано польовий матеріал та проведено первинні розрахунки з оцінювання лісотаксаційних показників і запасів біомаси. Ковбасою Я. В. зібрано польовий матеріал та проведено первинні розрахунки з оцінювання лісотаксаційних показників і запасів біомаси. Бузиль М. А. зібрано польовий матеріал та проведено первинні розрахунки з оцінювання лісотаксаційних показників і запасів біомаси. Котляревською У. М. зібрано польовий матеріал та проведено первинні розрахунки з оцінювання лісотаксаційних показників і запасів біомаси. Сливою О. І. зібрано польовий матеріал та проведено первинні розрахунки з оцінювання лісотаксаційних показників і запасів біомаси*).

57. **Голяка Д. М.**, Левчук С. Е. Радіоекологічний моніторинг лісових екосистем. Розподіл ^{90}Sr і ^{137}Cs у деревині та ґрунтах соснових насаджень : науково-методичні рекомендації. Київ : Наукова столиця, 2019. 45 с. (*Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки, проаналізовано та узагальнено отримані результати, сформовано рекомендації для реалізації радіоекологічного моніторингу в лісах зони відчуження. Левчуком С. Е. виконано вимірювання активностей у пробах біомаси і ґрунту ^{90}Sr і ^{137}Cs*).

58. **Голяка Д. М.**, Левчук С. Е. Моделі біогеокругообігу (депо і потоків) ^{90}Sr у насадженнях Чорнобильської зони відчуження: науково-методичні рекомендації. Київ : Наукова столиця, 2019. 34 с. (*Голякою Д. М. здійснено постановку проблеми, опрацьовано фахову літературу, зібрано польовий матеріал, проведено розрахунки, проаналізовано та узагальнено отримані результати, надано прогнози динаміки таксаційних і радіоекологічних показників у типових насадженнях зони відчуження. Левчуком С. Е. реалізовано вимірювання активностей у пробах біомаси і ґрунту ^{90}Sr*).

59. **Голяка Д. М.** Розподіл радіонуклідів в основних депо лісових екосистем та оцінювання біопродуктивності і радіологічного стану лісів Чорнобильської зони відчуження : науково-методичні матеріали. Київ : НУБіП України, 2022. 225 с.

Колекції даних відповідно до принципів FAIR

60. **Holiaka D.**, Igarashi Y., Zadorozhniuk R., Holiaka M., Oleksandr L., Yoschenko V. Contamination levels of Sr-90 and Cs-137 in soil within Chornobyl forests and woody communities during 2020–2021 : dataset. – Tsukuba : Center for Research in Radiation, Isotopes, and Earth System Sciences, University of Tsukuba, 2025. URL : <https://doi.org/10.34355/CRiES.U.Tsukuba.00278> (accessed: 15.12.2025). (*Holiaka D. підготовлено набори даних польових і лабораторних вимірювань. Igarashi Y.*

форматування колекцій даних та їх метаданих. Zadorozhniuk R. проведено збір польового матеріалу. Holiaka M. проведено збір польового матеріалу. Oleksandr L. проведено збір польового матеріалу. Yoschenko V. проведено збір польового матеріалу).

Holiaka D., Zadorozhniuk R., Levchuk S., Holiaka M., Kiva O., Lesnik O., Diachuk P. ChEZ-data: datasets of stand parameters and radionuclide content in forest components (wood and soil) with results of training machine learning models for estimating ecological and economical roles of woody ecosystems in the Chernobyl Exclusion Zone : dataset. 2025. URL : <https://doi.org/10.5281/zenodo.17155398> (accessed: 15.12.2025). (Holiaka D. підготовлено набори даних польових і лабораторних вимірювань. Zadorozhniuk R. проведено збір польового матеріалу. Levchuk S. здійснено вимірювання вмісту радіонуклідів. Holiaka M. проведено збір польового матеріалу. Kiva O. проведено збір польового матеріалу. Lesnik O. проведено збір польового матеріалу. Diachuk P. проведено збір польового матеріалу).

АНОТАЦІЯ

Голяка Д. М. Просторове і темпоральне оцінювання радіоекологічних показників лісів, забруднених радіонуклідами внаслідок Чорнобильської аварії. Кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді за сукупністю наукових публікацій.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора біологічних наук зі спеціальності 03.00.01 «Радіобіологія». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2026.

У дисертації представлено результати польових вишукувальних робіт, розрахунки, алгоритми і теоретичні узагальнення стосовно розподілу вмісту і валової активності біологічно мобільних радіонуклідів ^{90}Sr і ^{137}Cs в компонентах лісових екосистем, забруднених внаслідок радіаційних випадів під час активної фази аварії на Чорнобильській атомній електростанції у 1986 р. Ґрунтуючись на сучасних підходах геостатистичного аналізу, дистанційного зондування Землі й машинного навчання, комплексно охарактеризовано лісові екосистеми української частини зони відчуження. Зокрема, визначено просторовий і ймовірний темпоральний розподіл потужностей поглинутих доз іонізуючого випромінювання, а також показники депонування ^{90}Sr та ^{137}Cs у біомасі. Отримані вихідні оцінки роботи використовувалися у прийнятті рішень щодо управління лісами в досліджуваному регіоні.

У першому десятилітті після Чорнобильської катастрофи (1986 р.) основна увага щодо вивчення накопичення та розподілу радіонуклідів була прикута до сільськогосподарських земель, бо саме продукція аграрного виробництва є основним джерелом надходження радіоізоотопів в організм людей на забруднених територіях. З часом з'ясувалося, що ступінь радіоактивного забруднення продукції сільського господарства за декілька десятиліть зменшився в десятки разів, а компонентів лісових фітоценозів лише у 2–3 рази. Тому наразі велика

кількість досліджень, які проводяться в наукових установах України та закордоном, присвячена лісовим екосистемам. За останнє десятиліття лише вченими Українського науково-дослідного інституту сільськогосподарської радіології Національного університету біоресурсів і природокористування України виконувалася й досі виконується низка міжнародних наукових проєктів з дослідження впливу радіоактивного забруднення на деревні види, а також біологічного кругообігу радіонуклідів у забруднених лісових територіях, зокрема, за сприяння Міжнародного агентства з атомної енергетики (МАГАТЕ), Інституту радіаційного захисту і ядерної безпеки (IRSN, Франція), в межах спільного японсько-українського проєкту SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable) та інших. Зазначені проєкти є системним продовженням попередніх досліджень у галузі лісової радіобіології та радіоекології, що дало змогу розкрити питання міграції і перерозподілу радіонуклідів, радіобіологічних ефектів для деревної рослинності, виявити основні потоки й депо ^{137}Cs і ^{90}Sr та надалі дозволяють здійснити прогнозування радіоізотопів у компонентах лісу. Однак подібних результатів в українській і світовій науці щодо потенційно небезпечніших для лісів Чорнобильської зони відчуження ^{90}Sr було обмаль, що вимагало проведення в короткі терміни комплексних досліджень цих радіонуклідів (^{137}Cs і ^{90}Sr) та порівняння їх поведінки в різних компонентах лісових екосистем. Тому збір польового матеріалу для отримання статистично значущих вихідних результатів дисертації тривав понад 8 років.

Метою роботи було виявлення закономірностей просторового, темпорального й біогеоценозного розподілу біологічно мобільних радіонуклідів і біомаси в найбільш радіаційно забруднених лісових екосистемах, а також диференціація цих насаджень щодо їх екологічних функцій та можливості господарського використання.

Оцінювання радіоекологічних характеристик компонентів лісової екосистеми здійснено із застосуванням підходів класичної лісової таксації, лісівництва, ґрунтознавства, дозиметрії, агрохімії, гамма-спектрометрії, бета-спектрометрії, дендрохронології, метеорології та багатьох інших дисциплін, що робить вивчення депо і біогенних потоків мультидисциплінарним. Для прототипування концептуальної схеми біогеокругообігу ^{90}Sr в лісових екосистемах використано радіоекологічну модель TRIPS (“Transfer of Radionuclide In Perennial vegetation Systems”), яка була попередньо імплементована для симуляції кругообігу ^{137}Cs (Thiry, 2018). З урахуванням більшої фрагментарності для відсіків біомаси і ґрунту було додано до кінцевого варіанта розробленої моделі додаткові депо цих елементів лісового біогеоценозу, а також представлено кореневу систему як проміжну ланку вихідного потоку радіонукліда в надземну частину деревостану. За допомогою застосування ансамблевих метаалгоритмів машинного навчання XGBoost підтверджено можливість моделювання радіоекологічних показників насаджень на рівнях: першому – окремих невеликих ділянок лісу розміром 50–1000 м², використавши емпіричні дані з експериментальних майданчиків; другому – локальних полігонів площею 15–50 га, базуючись на стереограмметричній аерозйомці з БПЛА; та на третьому –

регіональному рівні з включенням усіх насаджень у межах української частини зони відчуження та 10 км буфера навколо неї на основі даних зйомки супутникового угруповання Sentinel-1 і Sentinel-2 2019 та 2020 років. Окремі отримані натреновані XGBoost-моделі стали основою для інтегрованого комплексного алгоритму просторово-темпорального оцінювання показників насаджень у межах лісового фонду зони відчуження, послідовність розрахунків якого представлено у вигляді коду мовою Python у середовищі (блокноті) Jupyter Notebook.

Модифіковано й апробовано методику оцінювання біомаси і середньої активності питомої активності радіонуклідів в анатомічних органах стовбурів дерев (зовнішньої кори, внутрішньої кори (луб, камбій), заболоні та ядра), заболоневих і ядрових видів для завдань лісової радіоекології із використанням диференціювання функціональної залежності лінійної щільності досліджуваних органів на різних відносних висотах дерев. Розроблений підхід використано здобувачем для визначення показників радіонуклідного забруднення деревних стовбурів як одного із основних депо ^{137}Cs і ^{90}Sr в лісових екосистемах для подальшої реалізації симуляції їх кругообігу в біогеоценозі.

Отримано результати щодо статистичної значущості й точності експрес-методу непрямого вимірювання вмісту ^{90}Sr в деревині сосни і берези залежно від щільності потоку бета-частинок з поверхні кори стовбурів дерев цих деревних видів. Тіснота кореляційного зв'язку між переліченими ознаками перебуває на межі довірчого інтервалу за ймовірності 95 %, тому щільність потоку бета-частинок з поверхні кори може використовуватись лише для попереднього встановлення рівнів забруднення деревини радіостронцієм і за величини питомої активності цього радіонукліда в деревині сосни понад $1500 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Оцінено вертикальний перерозподіл радіоізоотопів в органічних і мінеральних шарах ґрунту на соснових ділянках. Підтверджено суттєву вертикальну міграцію ^{90}Sr , порівнюючи з ^{137}Cs в умовах дерново-підзолистих ґрунтів у сосняках Українського Полісся. В окремих випадках більша частина валової активності ^{90}Sr в ґрунті може бути локалізована глибше 30 см від межі «ґрунт – підстилка», що необхідно взяти до уваги при розрахунку коефіцієнтів переходу радіоізоотопу, а також при просторовій апроксимації даних про рівні забруднення на основі щільності забруднення ґрунту, отриманих у більш ранній період.

Охарактеризовано мінливості та радіальний розподіл питомих активностей ^{90}Sr і ^{137}Cs в стовбуровій деревині між «сусідніми» деревами в чистих за складом деревостанах берези повислої і сосни звичайної: по 50 спостережень для кожного виду. Детально розкрито перерозподіл досліджуваних радіонуклідів у деревному профілі стовбура середньовікових соснових дерев. Наведено закономірності трендів для біологічно активних Чорнобильських радіоізоотопів у шарах деревини від периферії до серцевини стовбура в деревах сосни звичайної, віком від 15 до 145 років ($N = 12$), та берези повислої, віком від 11 до 43 років ($N = 9$). На основі таких вихідних даних сформовано рекомендації щодо реалізації заходів для забезпечення уникнення заготівлі деревини з рівнями забруднення ^{90}Sr і ^{137}Cs , які

перевищують допустимі ліміти згідно з чинними гігієнічними нормативами України.

Грунтуючись на вихідних даних спостережень, проведених протягом 2016–2019 рр. за сосною та березовою ділянками (питомі активності й валові запаси ^{90}Sr і ^{137}Cs у вивчених депо та потоках органічної речовини й інші показники насаджень), оцінено особливості перерозподілу досліджуваних техногенних ізотопів на сучасному етапі після Чорнобильської аварії. Підтверджено значно вищу мобільність ^{90}Sr , порівнюючи з ^{137}Cs , не лише в мінеральній частині ґрунту, а в низхідних і висхідних біогенних потоках у деревостанах. Встановлено можливість депонування компонентами біомаси (надземною частиною деревостану і підстилкою) більшої половини валової активності ^{90}Sr від наявної в сосновому біогеоценозі, для ^{137}Cs основним депо (від самого 1986 р.) залишається органічний і верхній мінеральний шари ґрунтів. Розрахунки внеску окремих елементів у низхідний потік деревостану показали, що частка активності досліджуваних радіонуклідів у стовбурових метеорологічних рідких опадах (0,0–2,0 %) є статистично незначущою від обсягу інших складових і може нехтуватись при проведенні польових робіт та імітаційному моделюванні кругообігу ізотопів.

Модифіковано математичну радіоекологічну модель TRIPS і здійснено параметризацію системи рівнянь потоків ^{90}Sr між депо лісових екосистем, двох типових насаджень – хвойного (соснового) і листяного (березового), які імітують біогеоцикл досліджуваного радіоізоотопу та оптимізовані методом стохастичного градієнтного спуску через мінімізацію суми квадратів відхилень цільової функції. Оцінено динаміку перерозподілу активностей ^{90}Sr в компонентах біогеоценозів. Спрогнозовано часові ряди коефіцієнтів переходу радіонукліда з ґрунту до елементів стовбура.

Представлено закономірності радіальних приростів дерев сосни звичайної (52–89 років) за різних рівнів дозового навантаження іонізуючого випромінювання, локалізованих на західному сліду радіаційних випадів Чорнобильської АЕС у 1986 р. (потужність дози в повітрі станом на 01 грудня 2016 р. – $1,8\text{--}30,0\text{ мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$) та на контрольних ділянках у зоні відчуження і за її межами біля с. Рудня-Шпилівська, де потужності поглинутих доз були на рівні фонових – $0,12\text{--}0,16\text{ мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$. Дерева сосни звичайної, піддані впливу сублетальних доз випромінювання ($8,6\text{--}13,2\text{ Гр}$) на ділянці «Рудий ліс» (потужність дози в повітрі станом на 01 грудня 2016 р. – $10,0\text{--}17,5\text{ мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$), не продемонстрували відхилень щодо формування річних кілець через 30 років після аварії на ЧАЕС, порівнюючи з деревами, які піддалися впливу значно нижчих доз при радіаційному фоні за потужності дози $0,12\text{--}0,16\text{ мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$ у 2016 р. Однак для дерев у зоні летального ураження (де відмерло понад 90 % дерев сосни звичайної у 1986 році, а потужність зовнішньої дози склала $19,5\text{--}30,0\text{ мкГр}\cdot\text{год}^{-1}$ у 2016 році) статистично підтверджено зменшення радіального приросту протягом 1988–1991 рр., спричиненого радіаційним фактором. Для дерев з інших ділянок у цей період спостерігали локальний максимум радіального приросту.

Отримані протягом 2020–2021 рр. із понад 200 експериментальних майданчиків і 14 стереофотограмметричних полігонів емпіричні польові й лабораторні дані використано для параметризації XGBoost-моделей, які дали

змогу оцінювати показники деревостанів зони відчуження для встановлення їхніх лісотаксаційних ознак, екологічних і радіологічних аспектів, використовуючи як первинні дані результати надземних вимірювань та модифіковані дистанційні дані, отримані з використанням спектральних і радарних зображень підстилаючих поверхонь. Навчені алгоритми XGBoost застосовано для створення підходу інтегрованої оцінки просторового розподілу показників насаджень лісового фонду зони відчуження: найважливішою з вихідних ознак є імовірність перевищення допустимих рівнів вмісту ^{90}Sr і ^{137}Cs в деревині стовбурів деревостанів з урахуванням мінливості питомих активностей цих радіонуклідів в окремих деревах. Отримані вихідні результати просторового моделювання показників деревостанів для зони відчуження представлено у вигляді картографічних матеріалів, а алгоритм розрахунку опубліковано в репозиторіях GitHub і Zenodo.

Проведено мікроексперименти з оцінювання викиду ^{137}Cs під час ландшафтних пожеж за різних умов (типів екосистем, вологості горючих матеріалів, рівнів прогорання шарів підстилки чи при запалюванні живих зелених хвойних гілочок) на найбільш радіоактивно забруднених територіях безпосередньо поруч із Чорнобильською АЕС, а також проаналізовано зібраний матеріал про об'ємну активність радіоізоотопів у період найбільших пожеж 2016 та 2020 років. Отримані дані загалом підтверджують попередні результати інших вчених, де максимальний викид ^{137}Cs з горючих матеріалів підстилки оцінюється в 4 %, але підпал зелених гілочок сосни дозволив вперше виявити, що величина викиду цього ізотопу може сягати 24 %. Це є важливим результатом, що дозволяє вважати верхові пожежі у хвойних деревостанах зіставними з хвойною підстилкою щодо рівнів емісії ^{137}Cs в атмосферне повітря. Зазначене явище потрібно враховувати для покращення точності оцінювання радіологічного дозового навантаження для осіб, які беруть безпосередню участь у гасінні пожеж на радіаційно небезпечних землях.

Ключові слова: радіонуклід, лісова екосистема, біогеоцикл, алгоритм, ГІС, ^{90}Sr , ^{137}Cs , біомаса, ґрунт, XGBoost, коефіцієнт переходу, доза.

ANNOTATION

Holiaka D. M. Spatial and Temporal Assessment of Radioecological Indicators in Forests Contaminated with Radionuclides as a Result of the Chornobyl Accident. Qualifying scientific work in the form of a scientific report based on a collection of scientific publications.

Thesis for the Doctor degree of Biological Sciences in the specialty 03.00.01 “Radiobiology”. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2026.

The paper presents the results of field empirical surveys, calculations, algorithms, and theoretical generalizations concerning the distribution of activity concentration and gross activity for ^{90}Sr and ^{137}Cs radionuclides in forest ecosystems. Studied forests were contaminated due to radioactive fallout during the active phase of the 1986 Chornobyl nuclear power plant accident. The research focuses on forest ecosystems in the

Ukrainian section of the Exclusion Zone, analyzing bioproductivity, accumulation properties of ^{90}Sr and ^{137}Cs in biomass, absorbed doses of ionizing radiation for woody plants, and other parameters. State-of-the-art approaches in remote Earth-sensing, geostatistical analysis, and machine learning have been employed. The output data of the study has been used for decision-making on forest management in the region.

In the first decade following the Chornobyl disaster (1986), primary attention was given to studying the accumulation and distribution of radionuclides in agricultural land because agricultural products were the main source of radioisotopes entering the human body in contaminated areas. Over time, it became evident that the degree of radioactive contamination of agricultural products had decreased by orders of magnitude over several decades, whereas the contamination in forest ecosystems had only decreased by 2-3 times. As a result, a significant number of studies by both domestic and international scientific institutions have shifted their focus to forest ecosystems.

The aim of this work is to identify patterns in the spatial, temporal, and biogeocenotic distribution of biologically mobile radionuclides and biomass in forest ecosystems, as well as to differentiate these forest stands according to their ecological functions and potential for economic use.

In the past decade, scientists from the Ukrainian Institute of Agricultural Radiology at the National University of Life and Environment Science of Ukraine have undertaken numerous national and international scientific projects to investigate the impact of radioactive contamination on tree species and determine the biological cycle of radionuclides in contaminated forest areas. These projects have been conducted with the assistance of the International Atomic Energy Agency (IAEA), the Institute for Radiation and Nuclear Safety (IRSN, France), the joint Japanese and Ukrainian project SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development), and others. The abovementioned projects systematically continue previous studies in forest radiobiology and radioecology, revealing issues of migration and redistribution of radionuclides, radiobiological effects on woody vegetation, as well as identifying the main fluxes and depots of ^{137}Cs and ^{90}Sr . They also enable the forecasting of radioisotope behavior in forest components. However, for the potentially more dangerous ^{90}Sr in the forests of the Chornobyl Exclusion Zone, there have been few results in both domestic and global science compared with ^{137}Cs , necessitating comprehensive studies of these radionuclides (^{137}Cs and ^{90}Sr) over a short period and comparing their behavior in different components of forest ecosystems. Therefore, the collection of field material to obtain statistically significant initial results for this dissertation spanned more than 8 years.

Evaluation of the radioecological characteristics of the components of the forest ecosystem was carried out using approaches from classical forest inventory, silviculture, soil science, dosimetry, agrochemistry, gamma spectrometry, beta spectrometry, dendrochronology, meteorology, and many other disciplines. This multidisciplinary approach makes the study of depots and flows of radionuclides comprehensive. The TRIPS (Transfer of Radionuclide In Perennial Vegetation Systems) forest radioecological model, which had previously been implemented to simulate the ^{137}Cs cycle (Thiry, 2018) was used for prototyping the conceptual scheme of ^{90}Sr biogeorecycling in forest ecosystems. Considering the greater fragmentation of biomass

and soil compartments, additional depots of these elements in the forest ecosystems were added to the final version of the developed model. The root system was designated as an intermediate link in the outgoing flow of the radionuclides into the aboveground part of the stand. Using the XGBoost machine learning ensemble meta-algorithm, it was possible to model the parameters of plantations at the level of individual small forest areas (50–1000 m²) using empirical data from experimental sites and local polygons (15–50 hectares), based on stereogrammetric aerial photography from UAVs. At the regional level, the modeling included all plantations within the Ukrainian part of the exclusion zone and a 10 km buffer around it, based on satellite surveys from the Sentinel-1 and Sentinel-2 constellations in 2019 and 2020. Some of the trained XGBoost models formed the basis for an integrated complex algorithm for the spatial-temporal assessment of plantation parameters within the forest fund of the exclusion zone. The sequence of calculations for this assessment is written in Python scripts in the Jupyter Notebook file.

A modified method was developed for estimating the biomass and average activity of radionuclides in the anatomical organs of tree trunks (outer bark, inner bark (bast, cambium), sapwood, and heartwood) for different tree species based on the anatomical build of the trunk. This method uses the differentiation of the functional dependence of the linear density of the studied organs on different relative heights of trees. The developed approach was employed by the author to determine the parameters of radionuclide contamination of tree trunks, which are one of the main depots of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in forest ecosystems. Obtained data have been the basis for further implementation in the simulation of their cycle in biogeocenosis.

The results on the statistical significance and accuracy of the express method of indirect measurement of the activity concentration of ⁹⁰Sr in pine and birch wood depending on the density of the flux of beta particles from the bark of tree trunks of these tree species were obtained. The closeness of the correlation between the listed features is at the limit of the confidence interval at a probability of 95%, so the use of the flux density of beta particles from the bark surface can only be used to pre-establish contamination levels of radiostrontium in trunk wood and if the value of the activity concentration of this radionuclide in pine wood is more than 1.5 kBq kg⁻¹.

The vertical redistribution of radioisotopes in pine forests' organic and mineral soil layers was evaluated. Significant vertical migration of ⁹⁰Sr compared to ¹³⁷Cs in sandy sod-podzolic soils in pine forests of Ukrainian Polissya was confirmed. In some cases, more than half of the available gross activity of ⁹⁰Sr in the soil can be localized deeper than 30 cm from the 'soil-litter' boundary. This must be considered during calculating the radionuclide aggregated transfer factor and when performing a spatial approximation of data on contamination levels based on the density of soil contamination obtained in the first decade after the Chornobyl accident.

The variability and radial distribution of activities concentration of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs in stem wood between neighboring trees in pure stands of Silver birch and Scots pine were characterized based on 50 observations for each species. The redistribution of the studied radionuclides in the trunk profile of middle-aged pine trees was revealed in detail. Patterns of trends for ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs activity in wood layers are presented, showing distribution from the periphery to the trunk core in Scots pine trees aged 15 to

145 years (N=12) and Silver birch aged 11 to 43 years (N=9). Based on the initial data from this part of the dissertation, recommendations are provided for measures to ensure the avoidance of timber harvesting with ^{90}Sr and ^{137}Cs contamination levels exceeding the permissible limits according to current hygienic standards in Ukraine.

Initial data from observations during 2016–2019 for pine and birch experimental sites (activity concentrations and gross inventory activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs) in the studied depots and flows of organic matter, as well as other parameters of plantations, were used to evaluate the redistribution characteristics of the studied isotopes at the present stage after the Chornobyl accident. The significantly higher mobility of ^{90}Sr compared to ^{137}Cs was confirmed not only in the mineral part of the soil but also in descending and ascending biogenic flows in forest stands. It was established that more than half of the gross activity of ^{90}Sr available in the pine ecosystems can be deposited by biomass components (aboveground part of the stand and litter). For ^{137}Cs , the main depot since 1986 remains the organic and upper mineral soil layers. Calculations of the contribution of individual elements to the descending flow of ^{90}Sr and ^{137}Cs activity in the forest stand showed that the share of stem meteorological liquid precipitation (0.0–2.0%) is statistically insignificant compared to the radionuclides activity of other components and may be neglected during fieldwork.

The mathematical forest radioecological model of TRIPS was modified, and its system of equations describing the flows of ^{90}Sr activity between the depots of forest ecosystems in two typical plantations, coniferous (pine) and deciduous (birch), was supplemented. This system simulates the biogeorecycling of the studied radioisotope and was parameterized using the stochastic gradient descent method by minimizing the sum of squares of deviations of the objective function. The trained models were used to estimate the dynamics of ^{90}Sr activity redistribution in the components of forest ecosystems and the time series of this radionuclide's aggregated transfer factors from the soil to the trunk organs.

The regularities of radial growth of Scots pine trees (52–89 years old) at different levels exposure to ionizing radiation, which localized on the western radioactivity trace of fallout from the Chornobyl NPP in 1986 (dose rate in the air as of December 1, 2016 was 1.8–30.0 $\mu\text{Gy h}^{-1}$) and at control sites in the exclusion zone and beyond near the village of Rudnya-Shpylivska, are presented. The absorbed external dose rates at the control sites were at the background level of 0.12–0.16 $\mu\text{Gy h}^{-1}$. Scots pine trees exposed to sublethal radiation doses of 8.6–13.2 Gy at the Red Forest site (dose rate in the air as of December 1, 2016 was 10.0–17.5 $\mu\text{Gy h}^{-1}$) did not show deviations in terms of the formation of annual rings during 30 years after the Chornobyl accident compared to trees in the control areas. However, for trees in the zone of lethal damage (where more than 90% of Scots pine trees died in 1986, and the external dose rate was 19.5–30.0 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ in 2016), a decrease in radial growth during 1988–1991 was statistically confirmed. For trees from other sites, a maximum of radial growth was observed during this period.

During 2020–2021, the obtained empirical field and laboratory data from more than 200 experimental sites and 14 stereophotogrammetric sites were used to parameterize developed XGBoost models. These models enabled the assessment of forests in the exclusion zone to establish their stand parameters, environmental, and

radiological aspects. This assessment utilized above-ground measurements and modified remote data obtained using spectral and radar images of the Earth's surface. The trained XGBoost algorithms were used to create an integrated approach for estimating the spatial distribution of parameters of the forest fund plantations in the exclusion zone. One of the most important initial features is the probability of exceeding permissible levels of ^{90}Sr and ^{137}Cs in the trunk wood of stands, with considering the variability of the activity concentration of these radionuclides in individual trees. The output results of spatial modeling of forest stands for the exclusion zone were presented in the form of cartographic materials, and the calculation algorithm was published in the GitHub and Zenodo repositories.

Micro-experiments were conducted to assess the release of ^{137}Cs during wildfires under varying conditions, including different ecosystem types, fuel moisture content, degrees of litter layer combustion, and the ignition of live green coniferous branches, in the most radioactively contaminated areas in the immediate vicinity of the Chornobyl NPP. Also, the collected samples were analyzed to determine the volumetric activity of radioisotopes during the periods of the largest fires in 2016 and 2020. The obtained results generally confirm previous findings reported in the research publications, indicating that the maximum release of ^{137}Cs from combustible litter materials is approximately 4%. However, the burning of green pine branches revealed for the first time that the release of this radionuclide can reach up to 24%, suggesting that crown fires in coniferous stands may be comparable to coniferous litter in terms of ^{137}Cs activity emissions into the atmosphere air. This phenomenon must be taken into account to improve the accuracy of radiological dose assessment for personnel directly involved in fire suppression activities on radionuclides-contaminated lands.

Key words: radionuclide, forest ecosystem, biogeorecycling, algorithm, GIS, ^{90}Sr , ^{137}Cs , biomass, soil, XGBoost, aggregated transfer factor, dose.