

ОЦІНЮВАННЯ ВМІСТУ ^{90}Sr У ДЕРЕВИНІ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ НА ОСНОВІ ВИМІРЮВАННЯ ЩІЛЬНОСТІ ПОТОКУ БЕТА-ЧАСТИНОК ІЗ ПОВЕРХНІ КОРИ СТОВБУРА

Д. М. ГОЛЯКА, кандидат сільськогосподарських наук

<https://orcid.org/0000-0001-8025-8885>, e-mail: holyaka_d_m@ukr.net

С. Є. ЛЕВЧУК, кандидат біологічних наук

<https://orcid.org/0000-0001-5167-7773>, e-mail: slavalevchuk64@gmail.com

Я. А. САВИЦЬКА, кандидат технічних наук

<https://orcid.org/0000-0002-5771-0076>, e-mail: yasawitskaya@gmail.com

О. М. ЛЕСНИК, кандидат сільськогосподарських наук

<https://orcid.org/0000-0002-4287-3454>, e-mail: lesnik@nubip.edu.ua

В. В. ГУМЕНЮК, кандидат сільськогосподарських наук

<https://orcid.org/0000-0003-4143-0739>, e-mail: v.v.gumeniuk@nubip.edu.ua

В. С. МОРОЗОВА, кандидат біологічних наук

<https://orcid.org/0000-0002-7245-1084>, e-mail: biohimik@ukr.net

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Ю. С. ПРОКОПУК, кандидат біологічних наук

<https://orcid.org/0000-0001-8844-0219>, e-mail: ju.prokopuk91@gmail.com

Інститут еволюційної екології НАН України

О. В. КАШПАРОВА, аспірантка*

<https://orcid.org/0000-0002-3879-2010>, e-mail: elena.kasharova@gmail.com

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Процес вимірювання вмісту ^{90}Sr у компонентах лісових екосистем із застосуванням радіохімічних методів потребує значних затрат часу та праці для отримання вихідних результатів. Менш точно, однак швидке оцінювання цього 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 дають змогу значно зменшити обсяги польових і 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 за $p = 0,05$, зв'язки між питомою активністю ^{90}Sr у стовбурній деревині та результатами вимірювання щільності бета-потіку радіометром із поверхні кори деревних стовбурів сосни звичайної на висоті 1,3 м 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 й усій деревині) та поверхневою щільністю

* Науковий керівник – доктор біологічних наук, професор І. М. Гудков.

поток бета-частинок з кори дерев, що використані для створення регресійних рівнянь, які придатні для попереднього оцінювання питомої активності досліджуваного радіоізотопу в деревині у польових умовах ($R^2 = 0,90-0,96$). Ідентифіковано тісну кореляцію ($r = 0,93$) між середнім діаметром деревостану та відношенням концентрацій ^{90}Sr у заболоні до питомої активності радіонукліда в ядровій деревині стовбурів. Встановлено залежності вмісту ^{90}Sr від щільності потоку бета-частинок із поверхні кори стовбурів дерев та співвідношення питомої активності цього радіонукліда між заболонню і ядром цілком можна рекомендувати як спосіб для експрес-вимірювання ^{90}Sr у деревині сосни звичайної. Однак, враховуючи незначний обсяг вибірки та важливість розглянутого питання, необхідно продовжити роботи у вказаному напрямі зі збільшенням кількості емпіричних даних для соснових деревостанів, а також залученням спостережень за іншими основними лісотвірними деревними видами зони відчуження.

Ключові слова: лісова екосистема, радіонуклід, питома активність, заболонь, ядро, стовбурна деревина, Чорнобильська зона відчуження.

Актуальність. Гетерогенність радіоактивного забруднення полягає не тільки у значній просторовій мінливості, а й неоднорідності радіонуклідного складу та різними фізико-хімічними особливостями його перерозподілу в екосистемах (Khomutinin et al., 2020). Водночас, коренева доступність біологічно мобільних радіонуклідів (^{137}Cs і ^{90}Sr) для біомаси лісових угруповань може різнитися на порядки, що найчастіше виражається у вигляді відповідних коефіцієнтів переходу (Vilous et al., 2020). З огляду на це, завжди існує ймовірність отримання на «відносно чистій» ділянці насадження елементи деревостану зі значним перевищенням рівнів радіологічного забруднення, або навпаки. Результатами такого явища може стати перевищення рівнів гігієнічних нормативів за вмістом ^{137}Cs і ^{90}Sr для деревини й деревної продукції у місцях заготівлі деревини (Vilous et al., 2020) або необхідність значно збільшувати обсяг вибірки на експериментальних майданчиках із вивчення міграції радіонуклідів навіть у межах 10-кілометрової зони навколо ЧАЕС, бо часто малі значення питомих активностей цих радіонуклідів у компонентах лісових екосистем не дають змоги з достатньою статистичною достовірністю встановити показники їх

розподілів (Khomutinin et al., 2020). Тому попереднє уточнювальне польове оцінювання вмісту радіонуклідів, із можливістю отримання вихідних результатів протягом декількох годин, допоможе розпочинати лісогосподарські чи наукові роботи на лісових ділянках, постраждалих унаслідок радіаційного забруднення, без побоювань щодо отримання забрудненої лісової продукції чи незадовільних емпіричних даних дослідження.

Неруйнівні способи вимірювання вмісту радіонуклідів у компонентах лісових екосистем є надзвичайно важливими для прижиттєвих радіодозиметричних досліджень дерев'янистих рослин. За їх допомогою встановлюють величини внутрішнього опромінення референтних організмів, що зазвичай сягає понад 50 % загального опромінення у ближній зоні навколо Чорнобильської АЕС, в основному внаслідок розпаду ^{90}Sr та його дочірнього радіонукліда ^{90}Y (Beresford et al., 2020). Важливими критеріями можливості поширення таких експрес-методів є вартість обладнання і необхідна кваліфікація персоналу для роботи з ним. Розробки зазначених підходів і підтвердження їх достовірності часто висвітлюють у публікаціях українські та іноземні вчені (Agamrun et al., 2018;

Keisuke et al., 2018; Yoschenko et al., 2011; Yoshihara et al., 2019). Вдосконалення і апробація способів радіаційного контролю складових навколишнього середовища є надзвичайно актуальним завданням для держав, які мають розвинуту інфраструктуру об'єктів ядерної промисловості й атомної енергетики або зазнали локального радіоактивного забруднення техногенними радіонуклідами. Особливу увагу в цьому аспекті потрібно приділяти лісовим екосистемам, оскільки компоненти деревної біомаси можуть депонувати до 50 % валової активності ^{137}Cs та ^{90}Sr , локалізованих на лісових ділянках (Holiaka et al., 2020a).

Актуальність дослідження зумовлено можливістю використання його результатів для реалізації експрес-оцінювання шляхом непрямого вимірювання вмісту ^{90}Sr у деревині сосни звичайної за допомогою одного із найпоширеніших в Україні радіометрів-дозиметрів *СТОРА-ТУ РКС-01* (ЕКОТЕСТ, Україна).

Мета дослідження – охарактеризувати залежність питомої активності ^{90}Sr стовбурної деревини від щільності потоку бета-частинок із поверхні кори дерев сосни звичайної на висоті 1,3 м у зоні відчуження.

Для досягнення зазначеної мети поставлено такі основні *завдання дослідження*: виявити та статистично оцінити ймовірні кореляції і залежності питомої активності ^{90}Sr у стовбурній деревині та її анатомічних частинах від щільності потоку бета-частинок з поверхні кори дерев сосни звичайної; охарактеризувати вплив лісотаксаційних показників на співвідношення вмісту ^{90}Sr між заболонню і ядром стовбурів; запропонувати алгоритм проведення експрес вимірювання концентрації ^{90}Sr у деревині для лісогосподарських цілей і під час радіологічних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає у тому, що вперше підтверджено статистичну достовірність використання поверхневої щільності потоку бета-частинок для роздільного оцінювання вмісту ^{90}Sr у анатомічних частинах стовбурної деревини (заболоні, ядрі) дерев сосни звичайної.

Практичну значущість результатів дослідження зумовлено можливістю у польових умовах на лісових ділянках, представлених сосновими деревостанами, за короткий проміжок часу (від 2–3 хв.) здійснювати оцінювання вмісту ^{90}Sr у стовбуровій деревині, що дасть змогу ефективніше здійснювати радіаційний моніторинг лісових екосистем Чорнобильської зони відчуження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розвиток способів детектування і вимірювання рівнів радіаційного забруднення тісно пов'язаний із технічним прогресом приладів і устаткування, які використовують у цій сфері. Фактично, це окремий напрям досліджень, що нині переживає «бум» завдяки сучасним досягненням інформаційних технологій та автоматизації переважної більшості процесів передусім у медичних цілях, зокрема медичній радіології і радіаційній медицині, однак доробок у цій царині швидко знаходить практичне застосування і в інших галузях радіології (Ewert, 2016; Volterrani et al., 2019). Приміром, звичайні персональні дозиметри використовують у хвойних лісах Японії, постраждалих унаслідок аварії на АЕС у Фукусімі, для оцінювання динаміки вмісту ^{137}Cs у підстилці протягом року (Yoshihara et al., 2019). Розвиваються та модифікуються підходи щодо картування радіонуклідного забруднення за допомогою роботизованих комплексів і безпілотних літальних апаратів, де вміст і склад радіоі-

зотопів оцінюють на основі вимірювання їх бета- й гамма-випромінювань (Briechle et al., 2018; Zabulonov et al., 2015). Однак математичний апарат, який використовують для реалізації згаданих «ідей», розроблено ще в 1960–1970-х рр. (Khomutinin et al., 2018).

Швидке встановлення величини радіаційного забруднення компонентів лісу без відбору проб дає змогу одночасно вирішувати два основні завдання у процесі радіоекологічного моніторингу лісових екосистем: зменшується час перебування персоналу на ділянках із підвищеними рівнями іонізуючих випромінювань; повніше забезпечується бар'єрна функція лісів забруднених територій (зразки не транспортують для вимірювань до лабораторій). Зважаючи на це, українські та іноземні вчені розробили низку підходів із прогнозування поверхневої щільності забруднення ґрунту техногенними радіонуклідами гамма-випромінювачами (ІАЕА, 2003), зокрема із використанням аерообстежень (Pradeep Kumar et al., 2020), що надалі ставали основою для створення карт забруднення радіоізотопами, що характеризуються альфа- й бета-розпадом (Kashparov et al., 2018; Kashparov et al., 2020). Встановлення обмежень на вивезення зразків у разі перевищення регламентованих рівнів радіаційного забруднення за межі Чорнобильської зони відчуження сприяло розробленню способів оцінювання вмісту радіонуклідів у біомасі деревних рослинних угруповань *in situ* та *in vivo* (Ministry of Health of Ukraine & State Emergency Service of Ukraine, 2008), що успішно використано для встановлення прижиттєвих внутрішніх доз опромінення дерев сосни і берези в межах пунктів тимчасової локалізації радіоактивних відходів (ПТЛРВ) (Yoschenko et al., 2011). Постійний пе-

рерозподіл біологічно мобільних радіонуклідів у лісових біогеоценозах потребує щоразу здійснювати валідацію та верифікацію перелічених методів у разі їх застосування, особливо для ^{90}Sr , який у 7–10 разів швидше мігрує в елементах ґрунту і біомаси порівняно з ^{137}Cs .

Матеріали та методи дослідження. Упродовж 2017 р. на 13 експериментальних майданчиках у вигляді кругових пробних площ, представлених чистими сосновими деревостанами, на відстані 5–10 км від Чорнобильської АЕС, виміряно поверхневу щільність потоку бета-частинок із кори і відібрано проби деревини із 78 дерев на висоті 1,3 м, згідно зі способом пропорційно-ступінчастого представництва. Середні таксаційні показники деревостанів були в інтервалі: вік – 27–97 років, діаметр – 12–36 см, висота – 12–28 м, відносна повнота – 0,62–1,19, запас стовбурів – 129–409 м³·га⁻¹. Щільності забруднення ґрунту (в перерахунку) станом на січень 2020 р. перебували у діапазоні для ^{137}Cs – 170–1700 кБк·м⁻², для ^{90}Sr – 50–750 кБк·м⁻². Вміст ^{90}Sr у стовбурній деревні становив 0,9–23,1 кБк·кг⁻¹. Проби деревини відбирали за допомогою вікового бура *Haglof* ($d = 5,5$ мм, $l = 500$ мм) і механічно розділяли на заболоневу та ядрову анатомічні частини.

Питому активність ^{90}Sr у деревині вимірювали за допомогою радіохімічного виділення радіонукліда після висушування зразків за температури 70°C, їх механічної гомогенізації, з наступним озоленням у муфельних печах за температур до 550°C (Central Research Institute of Agrochemical Service, 1985). Поверхневу щільність частинок бета-випромінювання кори стовбура (φ_{β}) встановлювали за допомогою радіометра-дозиметра *СТОРА-ТУ РКС-01* у два етапи: із закритою і

відкритою металічною кришкою бета-фільтра до чотирьох лічильників Гейгера–Мюллера, що відповідає значенням оцінок створюваних лише гамма-фоном (φ_γ) та гамма- і бета-забрудненням ($\varphi_{\beta+\gamma}$) відповідно, після чого виконували розрахунок показника:

$$\varphi_\beta = \varphi_{\beta+\gamma} - \varphi_\gamma \quad (1)$$

Аналіз отриманих вихідних польових і лабораторних даних виконано програмними продуктами *Microsoft Excel 365* і *RStudio 1.2* (мова програмування *R 3.6*).

Результати дослідження та їх обговорення. Кореляційний аналіз виявив тісні залежності між середніми арифметичними значеннями щільності потоку бета-частинок із поверхні кори і питомою активністю ^{90}Sr у стовбурній деревині ($r = 0,94$) дерев сосни звичайної на експериментальних майданчиках (критичне значення $r = 0,58$ за $p = 0,05$), а також її анатомічними частинами: заболонню ($r = 0,85$) і ядром ($r = 0,94$). Ідентифіковано сильний

зв'язок між середнім діаметром деревостану та відношенням вмісту ^{90}Sr у заболоні до питомої активності цього радіонукліда в ядрі ($r = 0,93$). З іншими таксаційними показниками концентрація ^{90}Sr у стовбурній деревині та її частинах характеризувалася значно меншими величинами коефіцієнта кореляції ($r = 0,02\text{--}0,49$).

Графічна інтерпретація залежностей питомої активності ^{90}Sr ($A_{\text{Sr-90}}$) у елементах деревини стовбура від щільності потоку бета-частинок із поверхні кори дерев (φ_β) вказує на можливість її опису простою лінійною функцією лише з одним кутовим коефіцієнтом (рис. 1). Прогнозні значення кутового коефіцієнта лінійних регресій становили (\pm квадратичне відхилення) для заболоні – $23,1 \pm 8,5$ Бк·см²·хв·(кг·част.)⁻¹, для ядра – $42,3 \pm 10,8$ Бк·см²·хв·(кг·част.)⁻¹, та усереднена величина для всієї стовбурної деревини (при об'єднанні анатомічних частин) – $26,8 \pm 6,8$ Бк·см²·хв·(кг·част.)⁻¹. Отримані результати виявилися схожими з вихідними даними

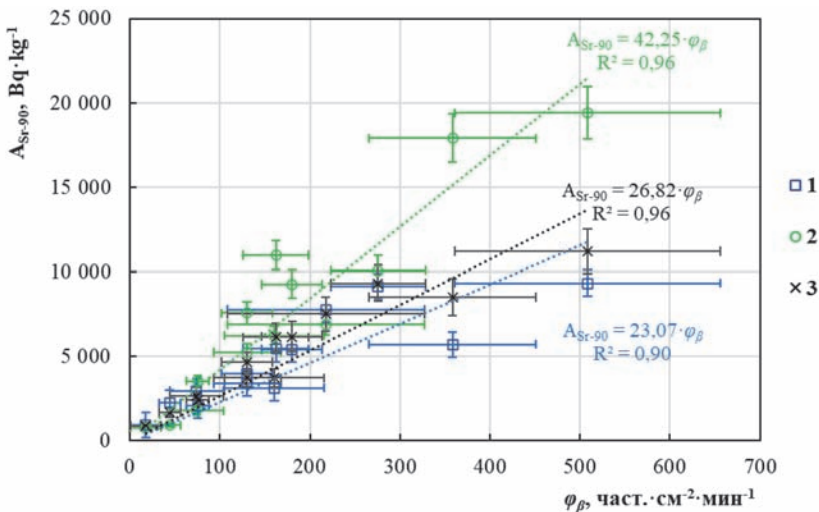


Рис. 1. Залежність середньої питомої активності ^{90}Sr у деревині стовбура (1 – заболоні, 2 – ядрі, 3 – всій деревині) від поверхневої щільності потоку бета-частинок на висоті дерева 1,3 м

наукової роботи, проведеної 15 років тому у соснових деревостанах 15–16-річного віку в межах ПТЛРВ «Рудий ліс» (Yoschenko et al., 2011), де такий самий коефіцієнт для заболоні стовбурів оцінений у $26 \pm 8 \text{ Бк} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{хв} \cdot (\text{кг} \cdot \text{част.})^{-1}$, однак зазначені дослідження проводили у такому віці дерев, коли ядрова частина деревини стовбура була ще не сформована, тому умовно вказаний показник представляє всю деревину стовбура у радіальному напрямку, що робить порівнювальні результати двох експериментальних робіт майже ідентичними (Holiaka et al., 2020b). Ці дослідження, на відміну від попередніх, дають змогу використовувати цей спосіб для оцінювання вмісту питомої активності ^{90}Sr у ядровій деревині.

Збільшення величини відношення вмісту ^{90}Sr у заболоні до питомої активності радіоізоотопу в ядрі ($A_{\text{S/H}}$) із збільшенням середнього діаметра деревостану (D) на соснових ділянках (рис. 2) пояснюється особливостями депонування цього радіонукліда у стовбурній деревині. Наразі, у радіальному напрямку, ^{90}Sr найбільше акумулювався на ймовірній межі заболоні та ядра дерев сосни звичайної в 1986–1992 рр. (Holiaka et al., 2020b). Від вказаного максимуму питомої активності радіонукліда в напрямку до кори стовбура вміст ^{90}Sr у деревині поступово зменшується у декілька разів. Однак у деревах віком понад 70 років (у цьому дослідженні вони відповідають середньому діаметру деревостану понад 30 см) через низьку мобільність радіоізоотопу в ядровій деревині після її формування у центрі стовбура утворюється місце з дуже низькою концентрацією ^{90}Sr , що «розбавляє» середню питому активність радіонукліда в ядрі стовбура, та відповідно спостерігається зростання значень відношення вміс-

ту ^{90}Sr у заболоні до його питомої активності в ядрі ($A_{\text{S/H}}$). Ця закономірність вступає у суперечність щодо застосування побудованих лінійних регресійних рівнянь (рис. 1) та/чи їх прогнозних кутових коефіцієнтів для оцінювання вмісту ^{90}Sr у елементах стовбурної деревини залежно від щільності потоку бета-частинок з поверхні кори, оскільки вони не відтворюють співвідношення між концентраціями ^{90}Sr в анатомічних частинах деревного стовбура з рахуванням середнього діаметра деревостану. Отже, потрібно застосувати різні алгоритми для оцінювання загальної питомої активності всієї деревини та за окремими анатомічними складовими стовбурної деревини. Зокрема, найдоцільнішим способом консервативного оцінювання вмісту ^{90}Sr у стовбурній деревині без виділення анатомічних частин є використання лінійної залежності питомої активності радіонукліда від щільності потоку бета-частинок із поверхні кори дерева на висоті 1,3 м (рис. 1), але у разі необхідності оцінити вміст радіонукліда у заболоні та ядрі роздільно (що зазвичай необхідно здійснювати під час радіологічних досліджень лісів), оптимальніше спочатку вирахувати концентрацію ^{90}Sr у заболоні із застосуванням відповідної лінійної регресії (рис. 1) та надалі розрахувати ймовірну питому активність радіонукліда для ядра на основі зміни відношення концентрацій ^{90}Sr у заболоні до його вмісту в ядрі залежно від середнього діаметра деревостану (рис. 2).

Отримані закономірності для експрес-оцінювання вмісту ^{90}Sr у стовбурній деревині деревостанів сосни звичайної розробленим способом не є статичними. З моменту потрапляння радіонукліда у 1986 р. до навколишнього середовища відбувається поступова трансформація і перерозподіл ^{90}Sr

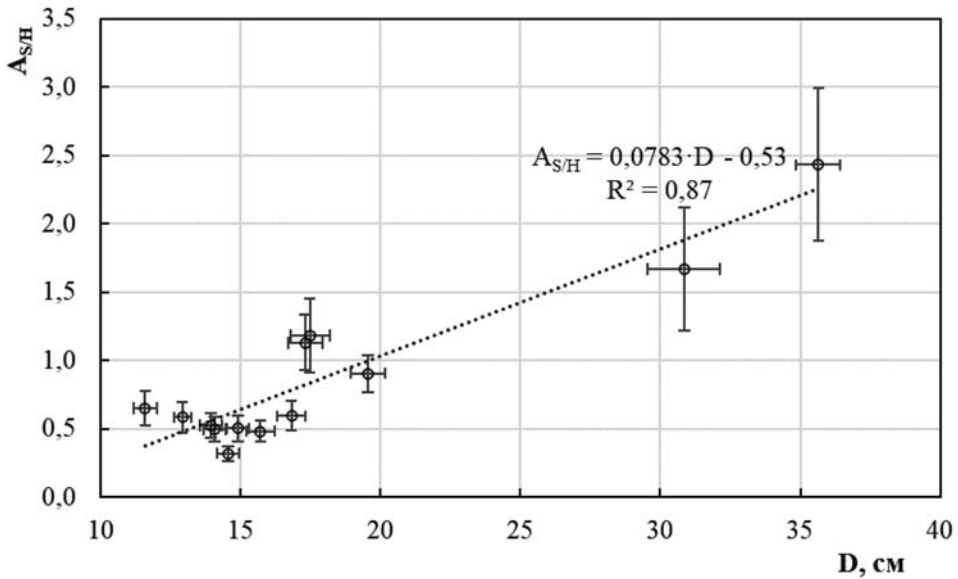


Рис. 2. Залежність значень відношення питомої активності ^{90}Sr у заболоні до ядра від середнього діаметра деревостану

у лісових екосистемах, зокрема у стовбурі деревних рослин, що потребує періодичного підтвердження вихідних кількісних показників цього дослідження у випадку практичної реалізації способу непрямого вимірювання питомої активності ^{90}Sr у стовбурній деревині на основі поверхневої щільності потоку бета-частинок із кори. Також необхідно врахувати «малий» обсяг отриманих спостережень для достовірної інтерпретації виявлених закономірностей із метою кращого розуміння обмежувальних чинників для застосування представленого підходу.

Висновки і перспективи. За результатами проведених досліджень підтверджено спроможність використання показника щільності потоку бета-частинок, отриманого за допомогою вимірювань радіометром-дозиметром *СТОРА-ТУ РКС-01* з поверхні кори деревного стовбура дерев сосни звичайної для попереднього оцінювання вмісту ^{90}Sr в стовбурній

деревині у польових умовах. Зв'язок між переліченими вище ознаками характеризується прямою лінійною залежністю, що використано для побудови регресійних рівнянь та пошуку їх параметрів. Описаний у роботі експрес-спосіб вимірювання питомої активності радіонукліда придатний для використання за питомої активності деревини стовбура понад $1 \text{ kBq} \cdot \text{kg}^{-1}$, тому може нині практично реалізовуватись у межах 30-кілометрової зони відчуження навколо Чорнобильської АЕС. Цей підхід оцінювання ^{90}Sr можна рекомендувати для попереднього оцінювання вмісту радіонукліда під час радіоекологічних і прижиттєвих радіодозиметричних досліджень соснових фітоценозів. Однак бажано виконувати верифікацію способу на «власному» масиві спостережень, оскільки отримана вибірка у цьому й попередніх дослідженнях та їх репрезентативність представлені незначним обсягом емпіричних даних.

Список літератури

- Aramrun, P., Beresford, N. A., & Wood, M. D. (2018). Selecting passive dosimetry technologies for measuring the external dose of terrestrial wildlife. *Journal of Environmental Radioactivity*, 182, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.12.001>
- Beresford, N. A., Barnett, C. L., Gashchak, S., Maksimenko, A., Guliaichenko, E., Wood, M. D., & Izquierdo, M. (2020). Radionuclide transfer to wildlife at a 'Reference site' in the Chernobyl Exclusion Zone and resultant radiation exposures. *Journal of Environmental Radioactivity*, 211, 105661. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.02.007>
- Bilous, A., Holiaka, D., Matsala, M., Kashparov, V., Schepaschenko, D., Lakyda, P., Shvidenko, A., Myroniuk, V., & Otrushko, L. (2020). ⁹⁰Sr content in the stemwood of forests within Ukrainian Polissya. *Forests*, 11, 270. <https://doi.org/10.3390/f11030270>
- Briechle, S., Sizov, A., Tretyak, O., Antropov, V., Molitor, N., & Krzystek, P. (2018). UAV-based detection of unknown radioactive biomass deposits in Chernobyl's exclusion zone. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2*, 163–169. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-163-2018>
- Central Research Institute of Agrochemical Service. (1985). *Methodical instructions for the determination of strontium-90 and cesium-137 in soils and plants* [in Russian].
- Ewert, U. (2016). Progress in digital industrial radiology – Part 1: Radiographic techniques-film replacement and backscatter imaging. *Nondestructive Testing and Diagnostics*, 1–2, 37–43. <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-051b8cf1-7577-40cf-a615-3066ee951f01/c/Evert.pdf>
- IAEA. (2003). *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data: IAEA-TECDOC-1363*.
- Holiaka, D. M., Levchuk, S. E., Kashparov, V. A., Holiaka, M. A., Yoschenko, L. V., Otrushko, L. N., Kosarchuk, O. V., & Lazarev, N. M. (2020a). Vertical distribution of ⁹⁰Sr in soil profiles and its uptake by Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood growing within the Chernobyl exclusion zone. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 21 (2), 157–165 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/jnpae2020.02.157>
- Holiaka, D., Yoschenko, V., Levchuk, S., & Kashparov, V. (2020b). Distributions of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr activity concentrations in trunk of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Chernobyl zone. *Journal of Environmental Radioactivity*, 222, 106319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106319>
- Iliev, I. I. (2019). Calibration of a system for airborne gamma spectrometry survey and mapping implementation. *Bulgarian Chemical Communications*, 51 (4), 611–617. <https://doi.org/10.34049/bcc.51.4.5128>
- Kashparov, V., Levchuk, S., Zhurba, M., Prot-sak, V., Beresford, N. A., & Chaplow, J. S. (2020). Spatial radionuclide deposition data from the 60 km radial area around the Chernobyl Nuclear Power Plant: results from a sampling survey in 1987. *Earth System Science Data*, 12 (3), 1861–1875. <https://doi.org/10.5285/a408ac9d-763e-4f4c-ba72-73bc2d1f596d>
- Kashparov, V., Levchuk, S., Zhurba, M., Prot-sak, V., Khomutinin, Yu., Beresford, N. A., & Chaplow J. S. (2018). Spatial datasets of radionuclide contamination in the Ukrainian Chernobyl Exclusion Zone. *Earth System Science Data*, 10 (1), 339–353. <https://doi.org/10.5285/782ec845-2135-4698-8881-b38823e533bf>
- Keisuke, K., Mitsutaka, Y., Yuto, N., Nobuo, S., Yong-Gen, Y., Toshihiro, Y., & Naoki, K. (2018). Development of an easy and simple method to measure the environmental radioactivity in trees with efficient personal dosimeters. *Radioisotopes*, 67 (9), 427–434. <https://doi.org/10.3769/radioisotopes.67.427>
- Khomutinin, Y., Glukhovskiy, O., Protsak, V., Kashparov, V., Levchuk, S., & Pavliuchenko, V. (2018). Cartographing of "spots" of radioactive pollution. *Nuclear and Radiation Safety*, 2 (78), 49–54 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32918/nrs.2018.2\(78\).08](https://doi.org/10.32918/nrs.2018.2(78).08)
- Khomutinin, Yu., Fesenko, S., Levchuk, S., Zhebrowska, K., & Kashparov, V. (2020). Optimising sampling strategies for emergency response: Soil sampling. *Journal of Environmental Radioactivity*, 222, 106344. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106344>
- Ministry of Health of Ukraine & State Emergency Service of Ukraine (2008). *About the statement of Rules of radiation safety at carrying out of works in the exclusion zone and the zone of unconditional (mandatory) resettlement*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0754-08#Text> [in Ukrainian].
- Pradeep Kumar, K. A., Shanmugha Sundaram, G. A., Sharma, B. K., Venkatesh, S., & Thiruvengadathan, R. (2020). Advances in gamma radiation detection systems for emergency radiation monitoring. *Nuclear Engineering and Technology*, 52 (10), 2151–2161. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.03.014>
- Volterrani, D., Erba, P. A., Carrio, I., Strauss, H. W., & Mariani, G. (Eds.). (2019).

- Nuclear Medicine Textbook*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-95564-3>
- Yoschenko, V. I., Kashparov, V. A., Melnychuk, M. D., Levchuk, S. E., Bondar, Yu. O., Lazarev, M., Yoschenko, M. I., Farfán, E. B., & Jannik, G. T. (2011). Chronic irradiation of Scots pine trees (*Pinus sylvestris*) in the Chernobyl exclusion zone: dosimetry and radiobiological effects. *Health Physics*, 101(4), 393–408. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e3182118094>
- Yoshihara, T., Kurita, K., Matsumura, H., Yoschenko, V., Kawachi, N., Hashida, Sh., Konoplev, A., & Yoshida, H. (2019). Assessment of gamma radiation from a limited area of forest floor using a cumulative personal dosimeter. *Journal of Environmental Radioactivity*, 204, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.03.023>
- Zabulonov, Yu. L., Burtnyak, V. M., & Zolkin, I. O. (2015). Airborne gamma spectrometric survey in the Chernobyl exclusion zone based on octocopter UAV type. *Problems of Atomic Science and Technology*, 5(99), 163–169. https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2015_5/article_2015_5_163.pdf

Holiaka D. M., Levchuk S. E., Savytska Ya. A., Lesnik O. M., Humeniuk V. V., Morozova V. S., Prokopuk Yu. S., Kashparova O. V.
ESTIMATION OF ^{90}Sr CONTENT IN WOOD OF SCOTS PINE BASED ON MEASUREMENT SURFACE FLUX DENSITY OF BETA-PARTICLES FROM STEM BARK

This paper presents an approach for indirect measuring of ^{90}Sr activity concentration in stem wood of Scots pine's live trees within the Chernobyl exclusion zone based on values of beta-particles surface flux density from stem bark at a tree height of 1.3 m above the forest floor that obtained by use STORA-TU RKS-01 radiometer-dosimeter under field condition. The similar express-methods often consider in scientific publications so as they allow to obtain probable levels of radiation contamination without taking samples for laboratory measurements. That in turn can be used to optimize sampling or for example in the case of the need to preserve the intact initial state of the biota during long-term in situ or/and in vivo observations. The empirical data for validation of the method have received on 13 experimental sites of artificial (plantation) even-aged stands which consist only of one woody species: Scots pine. The correlation analysis discovered statistical significant relation at $p\text{-value}=0.05$ between arithmetic averages of beta-particles surface flux density from stem bark of pine trees at the forest sites and ^{90}Sr activity concentration in stem wood elements (sap wood, heartwood and all stem wood), and functional dependencies among these parameters are described by a simple linear equation with only one slope parameters ($R^2 = 0.90\text{--}0.96$) whose predicted values for sap wood, heartwood, and all stem wood are (\pm standard deviation) 23.1 ± 8.5 , 42.3 ± 10.3 , and 26.8 ± 6.8 $\text{Bq}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{min}\cdot(\text{kg}\cdot\text{pcs})^{-1}$, respectively. Moreover, the influence of biometric indicators of individual trees (diameter, height, age) on this pattern was not detected. However, the average diameter (DBH) of stands has the strongest influence among forest inventory indicators on the value of the ^{90}Sr activity concentration ratio between sap wood and heartwood ($r = 0.93$), that is, the radial distribution of the studied radionuclide in stem wood of pine trees. The results of these studies should be confirmed by a larger collection of observations for Scots pine given the small sample size for her in this paper. Also, scientists are necessary to include empirical data for other major forest-forming woody species within the research region due to the importance of using express-methods of radioactive contamination levels estimation for the planning and optimization of forest management.

Keywords: forest ecosystem, radionuclid, activity concentration, sap wood, heartwood, stem wood, Chernobyl exclusion zone.

Отримано: 2021-02-10