

АНОТАЦІЯ

Мацала М. С. Динаміка лісового покриву Чорнобильської зони відчуження.
Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 205 «Лісове господарство». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню низки актуальних науково-практичних й теоретичних проблем, що пов'язані із функціонуванням, структурним і видовим розвитком, швидкістю сукцесій нових лісів на забруднених територіях Чорнобильської зони відчуження, а також із питаннями адекватного дистанційного моніторингу таких екосистем.

Ліси Чорнобильської зони відчуження є унікальними ландшафтами, що нині перебувають під охороною і зазнають доволі обмеженого антропогенного впливу, а традиційна господарська діяльність людини там є доволі незначною. Ці ліси початково були створені штучно, за підходами, традиційними для минулого століття. Саме ці наслідки колишнього управління лісами і є одним із факторів, що визначає нинішню динаміку лісів Чорнобильської зони відчуження – у взаємодії із змінами клімату та специфічними умовами місцезростання (радіоактивним забрудненням), а також режимами природних порушень, що змінюються. Прикладами останнього явища є частіші та катастрофічніші лісові пожежі, спалахи уражень лісовими шкідниками і хворобами, всихання лісів через абіотичний стрес внаслідок посухи.

Чисельні радіоекологічні дослідження впливу іонізуючого випромінювання на життєдіяльність, ріст і розвиток деревних рослин після аварій у Киштимі (1957 р.), Чорнобилі (1986 р.) та Фукусімі (2011 р.) вказують на те, що тільки за значних рівнів гострої радіації можливі важкі (зокрема летальні) наслідки для таких організмів. Традиційно референтними, тобто чутливими до дії радіації видами, що мають широкий географічний ареал розповсюдження, вважаються хвойні деревні види (такі, як сосна звичайна *Pinus sylvestris* L.), які найбільше постраждали від згубного впливу радіації у перші дні після Киштимської та Чорнобильської аварій. Хоча дослідники і робили висновок, що радіоактивне забруднення й за менших доз здатне викликати морфологічні зміни у сосни звичайної, у віддалений за часом період після аварій було доволі проблематично знайти достовірні негативні ефекти хронічного випромінювання навіть на хвойні рослини.

Важливим фактом є те, що практично усі дослідження впливу радіоактивного забруднення на ліси і деревні рослини відбувалися на рівні клітин, тканин, органів чи окремих екземплярів таких рослин. Водночас аналогічні дослідження лісових екосистем на рівні насаджень і ландшафтів в останні десятиліття фактично не проводилися.

Огляд дистанційних методів дослідження лісових екосистем, у тому числі таких, які є важкодоступними для збору актуальної інформації про ліси традиційним (наземним способом), вказує на актуальність використання відкритих супутникових даних. Просторове й темпоральне розрізнення, а також часовий проміжок, охоплений архівами космічних знімків супутників Landsat й Sentinel-2, є достатніми навіть для фрагментованих лісових ландшафтів України. У поєднанні з різноманітними методами машинного навчання, серед яких моделі «найближчих сусідів» та ансамблеві моделі, ці дані дозволяють отримати адекватні, географічно неперервні, зручні для подальшого аналізу карти наземного покриву, маски лісу та біометричних параметрів лісових екосистем.

Окремим питанням є точне відображення динаміки лісового покриву Чорнобильської зони відчуження за весь період після аварії (1986–2020 рр.). Для цього можна використати модель класифікації наземного покриву, що була натренована на основі даних інтерпретації лише за один рік. Водночас дані, спектрально вирівняні такими алгоритмами темпоральної сегментації супутникових знімків, як LandTrendr, є зручною основою для моделювання узгодженої у часі маски лісів, згарищ та інших важливих класів наземного покриву. Таким чином, щільні часові серії знімків Landsat дозволяють дослідити весь тренд розвитку лісових екосистем Чорнобильської зони відчуження після аварії і до наших днів, а також виявити важливі чинники, що викликали втрату лісового фонду чи появу нових лісів.

У дисертаційному дослідженні встановлено статистично достовірні (на 95 % рівні) ефекти хронічного радіоактивного забруднення (радіонуклідом ^{137}Cs у ґрунті) для низки показників розвитку нових лісових насаджень, що з'явилися на покинутих староорних землях у межах Чорнобильської зони відчуження. Зокрема, було виявлено, що за вищих рівнів хронічного іонізуючого випромінювання зростає частка дерев сосни звичайної із викривленими стовбурами. Дане явище узгоджується із попередніми дослідженнями вчених про морфологічні ефекти радіоактивного забруднення на рослини хвойних деревних видів.

Також встановлено, що за вищих рівнів ґрунтового забруднення радіонуклідами знижується й кількість дерев підросту. Аналогічно виявлено статистично достовірний ефект для частки сосни звичайної у видовому складі насадження. Усі три індикатори прямо (морфологія стовбура, частка сосни звичайної у складі насадження) або опосередковано (кількість підросту – більшість дослідних насаджень були представлені чистими сосняками) додатково вказують на те, що у віддалений після аварії проміжок часу радіація може здійснювати видимі (на рівні насадження) ефекти тільки на референтні, тобто хвойні, види рослин. Статистично достовірного впливу радіоактивного забруднення ґрунту на частку відмерлих дерев, видове і структурне різноманіття, кількість дерев основного ярусу, розвиток широколистяних деревних видів – виявлено не було.

У дисертаційному дослідженні встановлено, що різні методи машинного навчання дозволяють змоделювати просторовий розподіл біометричних параметрів молодих лісів у Чорнобильській зоні відчуження (суми площ поперечних перерізів та запасу стовбурів у корі) із достатнім рівнем точності. Так, середньоквадратична похибка коливалася у межах 49–71 % (від середнього у вибірці) для суми площ поперечних перерізів і у межах 65–98 % (від середнього у вибірці) для запасу стовбурів у корі. Найменшої похибки було досягнуто за допомогою моделі градієнтного бустингу. Водночас метод *k*-Nearest Neighbors дозволив точніше відтворити емпіричний розподіл (відповідно до даних кумулятивних функцій розподілу) та просторову семіваріацію вхідних даних. Отримані результати вказують на те, що супутникові дані Sentinel-2 та невелика вибірка тренувальних даних для моделі (102 тимчасові пробні площі) є достатніми для виявлення принципових відмінностей між методами моделювання. Створені карти біометричних показників нових деревостанів, що з'явилися після аварії на місці покинутих сільськогосподарських угідь, можуть слугувати базою для подальшої геопросторової оцінки розподілу депонованих радіонуклідів у стовбуровій деревині лісів. На прикладі радіонукліду ^{90}Sr показано, що саме просторове розрізнення карт ґрунтового забруднення визначає точність кінцевого продукту, що буде застосовуватися для оцінки екосистемних послуг лісів Чорнобильської зони відчуження.

У дослідженні встановлено, що дані щільних часових серій космічних знімків Landsat, спектрально вирівняні алгоритмом темпоральної сегментації LandTrendr, є надійним джерелом геопросторової інформації для дистанційного моніторингу лісів Чорнобильської зони відчуження. Зокрема, класифікаційна модель Random Forest, маючи загальну точність близько 80 і 90 % точності для класу наземного покриття «ліс» (тренувальні дані 2017 р.), з високим рівнем точності (близько 89 %) спрогнозувала лісову маску на валідаційному наборі даних (1988 р.). Незважаючи на катастрофічні лісові пожежі 1992, 2015–2016, й 2020 рр., лісовий покрив за період 1986–2020 рр. збільшився майже у 1,5 раза: з 41 % у 1986 р. до 59 % у 2020 р. Класифікаційна модель для усього періоду доступних супутникових даних є здатною до виявлення втрат лісів у Чорнобильській зоні відчуження внаслідок природних порушень та антропогенного впливу. Зокрема, результати моніторингу змін лісового покриття за розробленою моделлю показали значне співпадіння із даними глобальних продуктів Global Forest Change та HILDA. Водночас більша частина нових лісів, що з'явилися на покинутих сільськогосподарських угіддях, не була відображена у цих продуктах, що вказує на високу цінність розробленого підходу для цілей дистанційного моніторингу лісових екосистем Чорнобильської зони відчуження.

Ключові слова: радіоактивне забруднення, природні сукцесії, структура і розвиток лісів, Landsat, Sentinel, машинне навчання.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях інших держав,
включених до міжнародної наукометричної бази даних Scopus,
віднесених до першого квантиля (Q 1) відповідно до класифікації
SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports

1. **Matsala M.**, Bilous A., Myroniuk V., Diachuk P., Burianchuk M., Zadorozhniuk R. Natural Forest regeneration in Chernobyl Exclusion Zone: predictive mapping and model diagnostics. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2021 № 36 (2–3). P. 164–176. *(Здобувачем сформульовано ідею експерименту і його дизайн, взято участь у зборі емпіричних даних, проведено їхню обробку, аналіз і моделювання, написано первинний текст статті).*

2. **Matsala M.**, Bilous A., Myroniuk V., Holiaka D., Schepaschenko D., See L. The return of nature to the Chernobyl Exclusion Zone: increases in forest cover of 1.5 times since the 1986 disaster. *Forests*. 2021. № 12 (8). 1024. *(Здобувачем сформульовано ідею експерименту і його дизайн, інтерпретовано дані для моделювання, проведено моделювання і аналіз даних, написано первинний текст статті).*

Тези наукових доповідей

3. Holiaka D., **Matsala M.**, Otreshko L., Bilous A. Content of ^{90}Sr in live biomass compartments within forests of Ukrainian Polissya. Проблеми розвитку лісової таксації, лісовпорядкування та інвентаризації лісів: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 6–8 грудня 2018 року: тези доповіді. Київ, 2018. С. 20. *(Здобувачем проведено аналіз літературних даних, написано первинний текст тез доповідей).*

4. **Мацала М.**, Голяка Д., Білоус А. Забруднення ^{90}Sr ґрунту та біомаси лісів Чорнобильської зони відчуження: перспективи для оцінювання. Перспективи розвитку екосистемного менеджменту у лісовому комплексі та садово-парковому господарстві: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 18–19 квітня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 69. *(Здобувачем проведено аналіз літературних даних, написано первинний текст тез доповідей).*

5. Мацала М. Градієнтні бустингові моделі для оцінки біомаси лісів Українського Полісся. Лісова типологія як основа наближеного до природи лісівництва: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 9–12 жовтня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 57–58.

6. **Мацала М.**, Білоус А., Миронюк В. Динаміка природних порушень лісових екосистем Чорнобильської зони відчуження. Лісова типологія як основа наближеного до природи лісівництва: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 9–12 жовтня 2019 року: тези доповіді. Київ, 2019. С. 59–60. *(Здобувачем проведено аналіз літературних даних, моделювання, написано первинний текст тез доповідей).*

7. Мацала М. Вплив радіоактивного забруднення на природні молоді насадження Чорнобильської зони відчуження. Дослідження лісових та урбанізованих екосистем для забезпечення сталого розвитку: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 22 вересня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 28–29.

8. Matsala M. Mapping natural forests on the abandoned farmlands within Chernobyl Exclusion Zone. Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: 6-й Міжнародний конгрес, м. Львів, 23–25 вересня 2020 року: тези доповіді. Львів, 2020. С. 44.

9. **Matsala M.**, Bilous A. Understanding radiation effects on the structural, compositional and successional development of natural forests in Chernobyl Exclusion Zone. Теперішнє та майбутнє лісів екотону середніх широт: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 10–12 червня 2021 року: тези доповіді. Київ, 2021. С. 19–20. *(Здобувачем проведено аналіз літературних даних, моделювання, написано первинний текст тез доповідей).*

10. Matsala M. Forest cover dynamics within Chernobyl Exclusion Zone (1986–2018). Лісівнича наука: стан, проблеми, перспективи розвитку: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 23–24 червня 2021 року: тези доповіді. Харків, 2021. С. 291.