АНОТАЦІЯ

Дячук П. П. Оцінювання депонованого вуглецю соснових насаджень за даними інвентаризації лісу та дистанційних технологій. 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 оцінюванню депонованого вуглецю в соснових насадженнях із використанням технологій наземного та дистанційного збору даних.

Методологічну основу наземних вимірювань сформовано на принципах вибірково-статистичної інвентаризації лісів із використанням даних дистанційного зондування Землі, які представлені мультиспектральним зображенням, одержаним із супутника Sentinel-2A в період виконання наземних таксаційних робіт та даними аерофотозйомки, що зібрані за допомогою оптичної камери з безпілотного літального апарата.

Розвиток технологій дистанційного зондування з використанням непараметричних методів математичної статистики сприяє розвитку методів оцінювання екосистемних послуг лісів на основі вибіркових методів таксації лісу та даних дистанційного зондування Землі. Наразі використання даних дистанційного зондування Землі займає одне з провідних місць у вимірюванні параметрів та картуванні лісових екосистем як на глобальному, так і на регіональному рівні. Додатково на розвиток методів оцінювання екосистемних послуг лісів та інвентаризації депонованого вуглецю вплинув розвиток програмного забезпечення для обробки та аналізу даних.

У дисертації описано проблеми інвентаризації лісових ресурсів в Україні. Звернуто увагу на необхідність започаткування систематичної реалізації національної інвентаризації лісів, удосконалення лісовпорядкування та інших напрямів діяльності Державного агентства лісових ресурсів України, а також фізичну та моральну застарілість програмного забезпечення, що використовує Українське державне проектне лісовпорядне виробниче об’єднання ВО «Укрдержліспроект» у лісовпорядкуванні для створення та ведення реляційних баз даних і картографічних матеріалів.

Проаналізовано поширені методи збору та обробки даних таксаційних вимірювань і даних дистанційного зондування Землі, які були підібрані як ключові підходи для виконання досліджень, а також можливості використання безпілотних літальних апаратів в лісовому господарстві та способи визначення висоти дерев із даних, зібраних за допомогою сенсорів та бортових систем квадрокоптера.

Експериментальну основу досліджень забезпечено даними, зібраними на території досліджуваного полігону в межах Відокремленого підрозділу Національного університету

біоресурсів і природокористування України «Боярська лісова дослідна станція». Загальна площа досліджуваного полігону становила понад 10 тис. га, який розташований між значеннями довготи 30° 00’ С та 30° 12’ С і широти 50° 09’ Пн та 50° 20’ Пн. Ці координати було використано у вершинах прямокутника для формування мережі систематичної вибірки із розміщенням первинних одиниць вибірки через 1’, загальна кількість яких становила 1500. У межі досліджуваного полігону потрапило 419, з яких обстежено 345 проєктних місць закладання пробних площ.

Аналіз розподілу пробних площ дозволив отримати статистику досліджуваного полігону за категоріями земель та іншими таксаційними показниками та порівняти отримані результати із даними матеріалів лісовпорядкування.

Наземні дослідні матеріали представлено даними 234 кругових та 231 реласкопічних пробних площ систематичної вибірки лісового фонду. Загальна кількість дерев на кругових пробних площах становила 4484 шт., з яких 1443 шт. є модельними. Отже, для прогнозування таксаційних показників було сформовано два масиви даних. Перший масив даних отримано за результатами вимірювання модельних дерев, зокрема, діаметра та висоти. У цьому масиві розраховували об’єм кожного модельного дерева за класичною формулою таксації з використанням математичних моделей видового числа деревних стовбурів для відповідного деревного виду з урахуванням вікових груп. Другий масив даних – це облікові дерева, для яких спрогнозовано об’єм та висоту за допомогою непараметричного методу математичної статистики «*k*-Nearest Neighbors» (найближчих сусідів). Прогнозування висоти потрібно було для встановлення таксаційних показників деревостану, зокрема середньої висоти та класу бонітету. Загалом, на реласкопічних пробних площах було обліковано 5809 дерев.

Експериментальні дані попередньо було опрацьовано для роботи в програмному середовищі R. Додатково із матеріалів лісовпорядкування для пошуку сусідів за допомогою *k*-NN методу з метою прогнозування показників висоти та об’єму облікових дерев використано таксаційні показники деревостану (клас бонітету, вік та тип лісорослинних умов). Класам бонітету та типам лісорослинних умов присвоїли числові значення.

Розраховані показники стовбурового запасу та середньої висоти деревостану на основі даних кругових пробних площ, реласкопічних пробних площ та дані матеріалів лісовпорядкування аналізували та порівнювали між собою. У результаті встановлено відхилення таксаційних показників деревостану, до яких може призвести виділення субпроби для різновікових виділів та виявлено зміну панівного деревного виду залежно від методики закладання пробної площі.

Прогнозування таксаційних показників проводили із використанням *k*-NN методу. Пошук сусідів здійснювали на основі таксаційних показників окремого дерева (деревний вид,

клас віку та діаметр на висоті 1,3 м, у межах ±0,5 см, ±1,0 см, ±2,5 см), виділу (тип лісу) та деревостану (клас бонітету). Якщо не знаходилося жодного сусіда (k=1) з виконанням усіх умов, алгоритм продовжував шукати сусіда у межах діаметрів на висоті 1,3 м без класу віку, а вже потім без типу лісу. Алгоритм припиняв роботу, якщо було знайдено одного сусіда.

Порівняння прогнозованих показників дало можливість переконатися у ефективності критеріїв відбору сусідів для моделювання показників об'єму стовбурів та висоти облікових дерев. Визначені таксаційні показники деревостанів на пробних площах (середня висота та класи бонітету) були вищими, ніж ті, що вказані для відповідних виділів у матеріалах лісовпорядкування, на які потрапили пробні площі. Зокрема, у понад 30 % деревостанів було виявлено бонітет на два класи вищий, ніж було зазначено у таксаційному описі.

Результати розрахунків середніх таксаційних показників деревостану на кінцевому етапі дозволили оцінити обсяги депонованого вуглецю на пробних площах та провести їх порівняння.

Інтенсивність господарської діяльності в межах досліджуваного полігону створила фрагментарність лісового фонду. Пробні площі потрапляли на межі двох, іноді і трьох виділів, а також на межу до лінійних об'єктів, таких як лісові дороги, квартальні просіки тощо.

Закладання пробних площ на межі виділу з використання «методу проходу» чи «дзеркальної проби» ефективне для порівняння таксаційної характеристики пробної площі та виділу, на який припадає її центр. Використання даних пробних площ, закладених на межі виділу з використанням «методу проходу» чи «дзеркальної проби» для створення навчальної вибірки, може призвести до завищення результатів аналізу растрового зображення. Отже, до таксаційної характеристики проби додають «уявні» дерева, яких не існує в натурі, а растрове зображення має лише фактичну спектральну характеристику для пікселів, які потрапили на межу різних категорій земель.

Можливості використання безпілотних літальних апаратів для збору інформації про лісові екосистеми мають свої переваги та недоліки. Наразі безпілотні літальні апарати розглядають як обладнання для великого діапазону робіт, зокрема обстеження території, моніторингу змін у лісових екосистемах, догляду за деревами тощо. Збір даних за допомогою безпілотних літальних апаратів виділяють, з-поміж інших, через можливості використання різнопланових сенсорів від пасивних до активних та можливістю коригувати час, коли виконувати знімальні роботи, залежно від погодних умов та від потреби в збиранні інформації.

Використання стереофотограмметрії для обробки аерофотознімків із безпілотних літальних апаратів дозволило визначити показники висоти дерев у стиглих соснових

деревостанах із найменшою систематичною похибкою. Це обумовлено найменшим впливом оператора під час виконання робіт із найменшими затратами часу порівняно із використанням класичних приладів вимірювання висоти.

Перевірено можливості ідентифікації та вимірювання висоти дерев у стиглих соснових насадженнях на основі растрових зображень різної роздільної здатності, які демонструють переваги використання растрів із високим розширенням.

Супутникові дані дистанційного зондування є дієвим інструментом для оцінювання глобального та регіонального рівня, а дані з безпілотних літальних апаратів – для локального.

Класифікацію супутникового зображення для використання з метою оцінювання стовбурового запасу деревостанів та депонованого вуглецю було проведено за допомогою пакетів обробки даних *«raster»* та *«yaImpute»* в середовищі R, водночас, використано метод «*random Forest*» для створення тематичних карт запасів та депонованого вуглецю. Предикторами використано 12 показників, шість спектральних каналів супутникового зображення Sentinel-2 з рівнем обробки 2A та шість відносних показників вегетаційних індексів.

Порівняння оцінок депонованого вуглецю рослинної біомаси досліджуваного полігону, отриманих з аналізу багатошарового растрового зображення під час використання навчальних вибірок із даних кругових та реласкопічних пробних площ, продемонстрував наступні результати. Обсяг депонованого вуглецю з використанням даних кругових пробних площ становив – 1,286 Тг, що на 42 % більший, ніж розраховане значення за матеріалами лісовпорядкування 0,905 Тг, а обсяг депонованого вуглецю з використанням даних реласкопічних пробних площ становив 1,482 Тг, що на 62 % більше, ніж розраховане значення за матеріалами лісовпорядкування. Відхилення між оцінками за даними кругових і реласкопічних пробних площ становило 15 %.

Порівняльний аналіз оцінювання загального стовбурового запасу досліджуваного полігону різними методами показав значно менші відхилення, ніж значення депонованого вуглецю рослинної біомаси. За матеріалами лісовпорядкування загальний стовбуровий запас деревостанів досліджуваного полігону становив – 2685,8 тис. м^3. Під час аналізу растру з використанням навчальної вибірки на основі даних кругових пробних площ запас становив – 2888,97 тис. м^3. Це на 7,6 % більше значення, отриманого з матеріалів лісовпорядкування. Під час аналізу растру на основі даних реласкопічних пробних площ, запас становив 2508,47 тис. м^3, що на 6,6 % менше. Отже, загалом, відхилення за оцінюванням загальному запасу знаходиться в межах ± 10 %.

У дисертації представлено результати моделювання таксаційних показників дерев на основі непараметричних методів математичної статистики, а також порівняння показників оцінювання стовбурового запасу деревостанів та депонованого вуглецю за даними вибіркових

методів таксації з даними лісовпорядкування. Крім того, розглянуто можливості фотограмметричної обробки зображень, отриманих за допомогою безпілотного літального апарату для ідентифікації дерев та вимірювання висоти дерев у стиглому сосновому деревостані.

Ключові слова: *k*-NN метод, безпілотний літальний апарат, вибіркова таксація, реласкопічна таксація, мультиспектральні супутникові знімки, стереофотограмметрія.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Миронюк В. В., Білоус А. М., **Дячук П. П.**, Федина К. Р. Точність вибіркової таксації лісу залежно від конфігурації пробних ділянок. Біоресурси і природокористування. 2018. № 10 (5–6). С. 146–155. *(Здобувачем проведено збір дослідного матеріалу та опробування запропонованих підходів у польових умовах)*.

2. Миронюк В. В., Білоус А. М., **Дячук П. П.** Прогнозування таксаційних показників деревостанів на основі k-NN методу. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science. 2019. № 10 (2). С. 51–63. *(Здобувачем проведено збір дослідного матеріалу та аналіз літературних джерел)*.

3. Дячук П. П. Визначення висоти дерев за даними растрових зображень різної роздільної здатності. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science. 2020. № 11 (3). С. 15–24.

4. Білоус А. М., **Дячук П. П.**, Задорожнюк Р. М., Мацала М. С., Бур'янчук М. М. Точність вимірювання висоти дерев різними способами. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science. 2021. № 12 (1). С. 6–16. *(Здобувачем проведено збір та аналіз дослідних даних, встановлено характеристику систематичних похибок вимірювань)*.

Стаття у періодичному науковому виданні іншої держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу

5. Lakyda P., Shvidenko A., Bilous A., Myroniuk V., Matsala M., Zibtsev S., Schepaschenko D., Holiaka D., Vasylyshyn R., Lakyda I., **Diachuk P**., Kraxner F. Impact of disturbances on the carbon cycle of forest ecosystems in Ukrainian Polissya. Forests. 2019. № 10 (4). URL: http://doi:10.3390/f10040337. *(Здобувачем проведено аналіз літературних джерел та актуалізація дослідного матеріалу)*.

Свідоцтво про реєстрацію авторського права на науковий твір

6. Білоус А. М., Миронюк В. В. **Дячук П. П.** Методика обчислення стовбурного запасу лісових насаджень на пробних ділянках вибіркової інвентаризації лісу. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 85632 від 11.02.2019 р. *(Здобувачем проведено збір та аналіз дослідного матеріалу)*.

Тези наукових доповідей

7. Дячук П. П. Інвентаризація парникових газів в Україні: тенденції та перспективи розвитку. Стале управління лісовим комплексом та збалансований розвиток урболандшафтів: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 27 березня 2018 року: тези доповіді. Київ, 2018. С. 32.

8. Lakyda P., Bilous A., Myroniuk V., Vasylyshyn R., Lakyda I., Matsala M., **Dyatchuk P.** Disturbances impact on carbon emissions in forest ecosystems of Ukrainian Polissya. In Cool Forests at Risk? The Critical Role of Boreal and Mountain Ecosystems for People, Bioeconomy, and Climate. IBRA 2018, Laxenburg, Austria, September 17–20, 2018: Book of Abstracts. Laxenburg, Austria, 2018. P. 72. *(Здобувачем проведено аналіз літературних джерел та актуалізацію дослідних даних)*.

9. Bilous A., Myroniuk V., Matsala M., Vasylyshyn R., Holiaka D., **Diachuk P.** Disturbances impact on ecosystem services in forest ecosystems of Ukrainian Polissya. Addressing Ecological and Social Challenges for Forests and Forest Management: International scientific and practical conference, Kyiv, October 22–24, 2018: Book of Abstracts. Kyiv, 2018. P. 15. *(Здобувачем проведено аналіз літературних джерел та актуалізацію дослідних даних)*.

10. Bilous A., Myroniuk V., Matsala M., **Diachuk P.** Facing Climate Changes: Forest Carbon Stock in Ukrainian Polissya and Disturbances Impact. Litteris et Artibus. Environmental protection, natural resource management and tourism 2018: 5th International academic conference, Lviv, 23–25 November 2018: Book of Abstracts. Lviv, 2018. P. 274–275. *(Здобувачем проведено аналіз літературних джерел та актуалізацію дослідних даних)*.

11. Миронюк В. В., Білоус А. М., **Дячук П. П.** Методика обчислення стовбурового запасу лісових насаджень на пробних ділянках вибіркової інвентаризації лісу. Проблеми розвитку лісової таксації, лісовпорядкування та інвентаризації лісів: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 6–8 грудня 2018 року: тези доповіді. Київ, 2018. С. 100–101. *(Здобувачем проведено збір та аналіз дослідного матеріалу)*.

12. Holiaka D., Kato H., Yoschenko V., Igarashi Ya., Onda Yu., Holiaka M., Gumeniuk V., Lesnik O., **Diachuk P.**, Zadorozhniuk R. Identification and estimation of heights of the scots pine trees in the Chernobyl exclusion zone using stereophotogrammetry method. Problems of development of forest taxation, forest management and forest inventory: International Scientific-Practical Conference, Kyiv, December 6–8, 2018: Book of Abstracts. Kyiv, 2018. P. 21–22. *(Здобувачем проведено збір та аналіз дослідного матеріалу)*.

13. Миронюк В. В., Білоус А. М., **Дячук П. П.** Дешифрування таксаційних показників деревостанів на основі k-NN методу. 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. 36–37. *(Здобувачем проведено збір та аналіз дослідного матеріалу)*.

14. **Дячук П. П.**, Білоус А. М., Миронюк В. В. Створення просторових моделей дерев дуба звичайного, що ростуть на відкритому просторі. 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. 20.

(Здобувачем проведено збір та аналіз дослідного матеріалу, обґрунтовано особливості створення просторових моделей дерев).

15. Myroniuk V., Bilous A., **Diachuk P.**, Fedyna K., Matsala M. Configuring Sample Plots: Sample-Based Forest Inventory and Accuracy Implications. Smart Bio: 3nd International Conference, Kaunas, Lithuania, 2 May, 2019: Book of Abstracts. Kaunas, Lithuania, 2019. P. 279. *(Здобувачем проведено збір дослідного матеріалу)*.

16. **Дячук П. П.**, Білоус А. М. Визначення висоти за аерофотознімками високої роздільної здатності. Дослідження лісових та урбанізованих екосистем для забезпечення сталого розвитку: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 22 вересня 2020 року: тези доповіді. Київ, 2020. С. 21–22. *(Здобувачем проведено збір та аналіз дослідного матеріалу, обґрунтовано використання аерофотознімків високої роздільної здатності для визначення висоти деревостану)*.