

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Лелеки Дмитра Юрійовича
«Акумуляція органічного Карбону у старовікових лісах
ВододільноВерховинського хребта (Українські Карпати)»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 101
Екологія галузі знань 10 Природничі науки

Дослідження запасів органічного Карбону в лісових екосистемах безпосередньо пов'язане з оцінюванням їх ролі у регіональному та глобальному циклах Карбону, з'ясуванням механізмів довготривалого утримання органічної речовини та визначенням екологічних чинників, які контролюють її просторовий розподіл.

Особливе значення мають природні старовікові ліси, у яких сформована вікова і просторова структура деревостанів поєднується з накопиченням значних запасів живої та мертвої органічної речовини. Такі екосистеми дозволяють оцінювати не окремих компонент, а співвідношення основних карбонових пулів і закономірності їх функціонування за мінімального прямого антропогенного втручання.

Для Українських Карпат ця проблема має чітко виражений регіональний характер. Складний рельєф, експозиційна та висотна диференціація, відмінності кліматичних та едафічних умов, породного складу і віку деревостанів закономірно формують високу просторову неоднорідність запасів Карбону.

У цьому контексті тема дисертаційної роботи Д. Ю. Лелеки є актуальною, а обраний об'єкт дослідження - старовікові ліси ВододільноВерховинського хребта є репрезентативним для вирішення поставленого наукового завдання.

Структура роботи та загальна характеристика дослідження

Дисертаційна робота побудована логічно і складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Логіка дослідження послідовна: від аналізу сучасних уявлень про функціонування карбонового циклу в лісових екосистемах автор переходить до характеристики природних умов досліджуваної території, обґрунтовує систему дослідних ділянок і методів, викладає результати кількісного оцінювання основних карбонових пулів, а в заключному розділі здійснює їх екологічну інтерпретацію і зіставлення з даними для інших регіонів Карпат. Такий порядок викладу є виправданим і відповідає структурі поставленого наукового завдання.

Перший розділ «Депонування органічного Карбону лісовими екосистемами як інтегральний показник біосферної ролі лісів» має оглядово-аналітичний характер. Автор послідовно розглядає розвиток досліджень органічного Карбону у світі та в Україні, проблематику зміни клімату, роль біотичного циклу Карбону та значення лісових екосистем у регулюванні рівня атмосферного CO₂. Окремо проаналізовано дослідження органічного Карбону у гірських екосистемах. Позитивним є те, що огляд не обмежений характеристикою фітомаси. Вже на цьому етапі дисертації сформовано концептуальну схему подальшого дослідження: органічний Карбон розглядається як розподілений між

фітомасою, мертвою деревиною, лісовою підстилкою та ґрунтом. Саме такий підхід надалі реалізовано у власних дослідженнях.

У висновках до розділу автор наголошує, що співвідношення Карбону між окремими пулами визначається природно-кліматичними умовами, структурою деревостанів, властивостями ґрунтового покриву та інтенсивністю антропогенного впливу. Водночас функціональна роль пулів є різною: фітомаса забезпечує первинне зв'язування Карбону, а ґрунт і мортмаса мають більше значення для його довготривалого утримання. Це положення є логічною теоретичною основою подальшої експериментальної частини.

Разом з тим, оглядова частина місцями є дещо розлогою і містить матеріал, який міг бути поданий компактніше. Проте загалом розділ виконує необхідну функцію - визначає сучасний стан проблеми і формує систему показників, які надалі аналізуються в дисертації.

Другий розділ «Умови формування старовікових екосистем Вододільно-Верховинського хребта» присвячено характеристиці середовища, у якому сформувалися досліджувані лісові екосистеми. Автор аналізує фізико-географічні особливості території, клімат, ґрунтовий та рослинний покрив.

Цей розділ має безпосереднє відношення до основної гіпотези роботи, оскільки північний і південний макросхили Вододільно-Верховинського хребта розглядаються як екологічно неоднорідні територіальні комплекси.

У роботі показано, що асиметрія макросхилів проявляється у морфології рельєфу, температурному режимі, кількості та сезонному розподілі опадів, тривалості снігового покриву і характері зволоження. Важливо, що автор не обмежується констатацією кліматичної різниці.

Простежується логічний ланцюг: орографічні та кліматичні особливості → ґрунтовий режим → рослинний покрив → потенційно різні умови надходження і трансформації органічної речовини.

Рослинність також демонструє виразну експозиційну диференціацію: на південному макросхилі більшу участь мають букові ліси, тоді як на північному зростає роль ялиці та смереки. Таким чином, другий розділ не є формальною «характеристикою району досліджень». Він створює екологічне підґрунтя для подальшого зіставлення двох груп лісових екосистем. Водночас, уже на цьому етапі стає очевидним, що фактор «макросхил» є комплексним. Він включає орографічні, кліматичні, ґрунтові та фітоценотичні відмінності. Саме тому подальша інтерпретація різниці запасів Карбону між макросхилами має враховувати цю комплексність.

Третій розділ «Ділянки і методика досліджень» є принципово важливим для оцінки достовірності отриманих результатів.

Дослідження виконано на 26 пробних площах у межах північного і південного макросхилів Вододільно-Верховинського хребта.

Система ділянок охоплює природні старовікові ліси та деревостани, які за структурними характеристиками наближаються до старовікового стану. Це дозволило автору отримати достатньо широкий діапазон значень віку, запасу деревостану, структури фітомаси та інших характеристик.

Важливою перевагою методики є комплексність оцінювання органічного Карбону. Для фітомаси використано лісотаксаційні показники та відповідні розрахункові залежності. Для грубих деревних залишків проведено окремий облік великих гілок, сухостою та пнів, а на менших облікових площах — дрібніших фрагментів деревини. Об'єм визначали за геометричною моделлю зрізаного конуса з подальшим перерахунком через щільність мертвої деревини та вміст Карбону. Окремо оцінено запас лісової підстилки та ґрунтового органічного Карбону. Статистичний аналіз виконано із застосуванням програм PAST, R та MS Excel. Автор перевіряє характер розподілу даних, залежно від результатів застосовує параметричні або непараметричні критерії, використовує кореляційний аналіз та характеристики розміру ефекту. Цей момент заслуговує позитивної оцінки.

Проте, у роботі не використано універсальний статистичний критерій для всіх масивів даних. Наприклад, для сумарних запасів Карбону після перевірки нормальності застосовано t-тест Ст'юдента, тоді як для високоваріабельних і ненормально розподілених запасів Карбону у грубих деревних залишках використано U-тест Манна–Уїтні.

Четвертий розділ «Результати досліджень трансформації органічного Карбону в лісових екосистемах ВододільноВерховинського хребта» є основним результативним розділом дисертації.

У підрозділі 4.1 проаналізовано запаси органічного Карбону у фітомасі.

Середній запас Карбону у цьому блоці становив $179,79 \pm 94,40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ при діапазоні від 33,01 до $374,29 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Встановлено чітку різницю між макросхилами. Для південного макросхилу середній запас становив $241,78 \pm 85,44 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, для північного — $103,97 \pm 45,60 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Ця відмінність статистично значуща.

Проте найбільш змістовним результатом цього підрозділу є не сама різниця між двома групами, а встановлення її зв'язку з віковою структурою деревостанів. Вік деревостанів статистично значуще відрізнявся між макросхилами, а між віком і запасом Карбону у фітомасі встановлено сильний позитивний ранговий зв'язок. Це дає підстави вважати вікову структуру одним із ключових факторів формування запасів Карбону у фітомасі.

У підрозділі 4.2 досліджено грубі деревні залишки. Цей пул принципово відрізняється від фітомаси за характером просторової мінливості. Запаси Карбону у грубих деревних залишках змінювалися від 0,86 до $85,60 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Коефіцієнти варіації перевищували 95 % для обох макросхилів. Розподіл значень не відповідав нормальному, тому для порівняння застосовано U-тест Манна–Уїтні. Статистично значущої різниці між макросхилами не встановлено. Цей результат є важливим, оскільки демонструє інший тип контролю карбонового пулу мертвої деревини. Якщо фітомаса чітко пов'язана із віком та запасом деревостану, то кількість грубих деревних залишків визначається також фазою розвитку деревостану, природним відпадом, локальними вітровалами, історією порушень і швидкістю декомпозиції. Тому висока варіабельність цього показника не є статистичним «шумом», а відображає природну мозаїчність старовікової лісової екосистеми.

У підрозділі 4.3 оцінено запаси органічного Карбону у лісовій підстилці.

Вони становили від 2,85 до 10,59 т·га⁻¹, середнє значення — 6,75 ± 1,82 т·га⁻¹. Цей блок має меншу абсолютну частку у сумарному запасі, але є функціонально важливим, оскільки підстилка становить перехідну ланку між продукційним блоком і ґрунтом. Встановлені відмінності між макросхилами автор логічно пов'язує з неоднаковою структурою деревостанів, кількістю органічного опаду та умовами його трансформації.

У підрозділі 4.4 проаналізовано ґрунтовий пул органічного Карбону. Його запаси коливалися від 20,22 до 65,86 т·га⁻¹, середнє значення становило 33,93 ± 9,36 т·га⁻¹. На відміну від фітомаси, статистично значущої різниці між макросхилами не встановлено. Це важливий результат. Він показує, що ґрунтовий пул має іншу просторову структуру варіабельності і не повторює закономірності надземної фітомаси. Саме ця відмінність між поведінкою окремих пулів є однією з сильних сторін дисертації.

Підрозділ 4.5 інтегрує результати щодо окремих компонентів.

Сумарні запаси органічного Карбону становили від 65,83 до 468,01 т·га⁻¹ при середній величині 232,36 т·га⁻¹.

Для південного макросхилу середнє значення становило 303,10 т·га⁻¹, для північного — 161,43 т·га⁻¹. Різниця між групами є статистично значущою і характеризується великим розміром ефекту. У структурі сумарного запасу домінує фітомаса — близько 72 %. Частка ґрунту становить близько 14 %, грубих деревних залишків — 11 %, підстилки — 3 %. Отже, саме фітомаса визначає основну частину просторової варіабельності сумарного запасу Карбону. Цей висновок підтверджується і статистично: для ґрунту та грубих деревних залишків значущих зв'язків із сумарним запасом не встановлено.

Підрозділ 4.6 присвячено ґрунтовій мезофауні як біотичному чиннику трансформації органічної речовини. Цей матеріал доповнює кількісну оцінку карбонових резервуарів функціональною характеристикою детритного блоку. Автор обґрунтовано пов'язує роль мезофауни з первинною фрагментацією органічних решток, їх підготовкою до мікробної деструкції та перерозподілом органічної речовини між підстилкою і ґрунтом. Водночас цей блок слід трактувати саме як характеристику потенційного біотичного механізму трансформації органічної речовини, а не як пряме вимірювання потоку Карбону.

Загалом четвертий розділ містить значний масив фактичних даних, статистичне обґрунтування встановлених відмінностей і дозволяє порівнювати не лише абсолютні запаси Карбону, а й різні типи просторової поведінки окремих карбонових пулів.

П'ятий розділ «Обговорення результатів» має принципове значення, оскільки саме тут автор переходить від опису числових показників до їх екологічної інтерпретації.

Спочатку розглянуто загальні закономірності акумуляції органічного Карбону. Автор зіставляє внесок фітомаси, грубих деревних залишків, підстилки та ґрунту і показує, що ці пули відрізняються не лише за абсолютною величиною, але й за механізмами формування. Окремо проаналізовано вплив макросхилів. Інтерпретація цього фактора у розділі загалом є коректною, оскільки автор поступово відходить від простого твердження «південний макросхил — більший запас» і враховує структурні відмінності самих деревостанів. Це важливо,

оскільки експозиція у даному випадку не може розглядатися як ізольована незалежна змінна. Підрозділ, присвячений віковій структурі, є одним із ключових для пояснення отриманих результатів. Сильний позитивний зв'язок між віком деревостанів і запасом Карбону у фітомасі дозволяє автору обґрунтовано пов'язати більші сумарні запаси південного макросхилу зі значною часткою старших і структурно більш зрілих деревостанів.

Позитивним є включення окремого підрозділу щодо індивідуальних та екстремальних випадків. Для природних лісових екосистем крайні значення не обов'язково є артефактами. Вони можуть характеризувати конкретну фазу розвитку деревостану, локальний вітровал, підвищене накопичення мертвої деревини або інші природні процеси. Їх окрема інтерпретація є правильнішою, ніж механічне усунення з аналізу.

Завершальна частина розділу присвячена порівнянню з іншими регіонами Карпат — Сколівськими Бескидами, польською, словацькою та румунською частинами Карпат. Таке зіставлення дозволяє оцінити регіональну специфіку отриманих значень і показати, що запаси Карбону досліджуваних лісів перебувають у межах характерної для природних гірських лісів варіабельності. Разом з тим саме при таких порівняннях необхідно особливо уважно враховувати методичну зіставність даних: склад компонентів фітомаси, глибину ґрунтового профілю, критерії обліку мертвої деревини та способи перерахунку запасів у Карбон.

Загалом, п'ятий розділ виконує свою функцію і суттєво підсилює роботу, оскільки переводить отриманий масив даних із рівня локального опису до рівня екологічного узагальнення.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна роботи полягає у комплексному оцінюванні запасів органічного Карбону в основних компонентах старовікових лісових екосистем ВододільноВерховинського хребта.

Для досліджуваної території на єдиній методичній основі встановлено запаси Карбону у фітомасі, грубих деревних залишках, лісовій підстилці та ґрунті, визначено їх внесок у сумарний резервуар та проаналізовано характер просторової мінливості.

Встановлено статистично значущу різницю у запасах Карбону у фітомасі та сумарному резервуарі між дослідженими групами лісів.

Показано сильний зв'язок запасів Карбону у фітомасі з віком деревостанів.

Водночас продемонстровано інший характер просторової організації пулу грубих деревних залишків і ґрунтового Карбону, для яких аналогічної закономірності не встановлено.

Саме диференційована реакція окремих пулів, становить найбільш змістовну частину наукової новизни роботи.

Практичне значення

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання кількісних оцінок запасів Карбону для регіонального екологічного моніторингу, оцінювання стану природних лісів та порівняння їх із господарсько трансформованими деревостанами.

Старовікові ліси ВододільноВерховинського хребта можуть бути використані як регіональні референтні екосистеми при оцінюванні змін структури карбонових резервуарів під впливом лісокористування.

Практичну цінність мають також дані щодо співвідношення фітомаси, мертвої деревини, підстилки та ґрунту у сумарному запасі Карбону, оскільки оцінювання лише деревної фітомаси не відображає повної структури карбонового резервуару.

Повнота висвітлення результатів дисертації у наукових публікаціях та їх апробація

За темою дисертації здобувачем представлено 14 наукових праць, серед яких дві статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б», три статті у виданнях, проіндексованих у базах Scopus та/або Web of Science Core Collection, а також дев'ять праць, що засвідчують апробацію матеріалів дисертаційного дослідження.

На окрему позитивну оцінку заслуговує наявність трьох статей у виданнях, представлених у міжнародних наукометричних базах.

Дві статті опубліковано у *Biodiversity Data Journal*, ще одну — у *Biosystems Diversity*. Їх тематика пов'язана з мобілізацією даних природничих колекцій, інформаційними ресурсами про біорізноманіття та можливостями використання відповідних даних для його оцінювання. Ці публікації представляють ширший напрям наукової діяльності здобувача та характеризують його досвід роботи з біологічними даними і міжнародним рецензованим академічним середовищем.

Безпосередньо основні результати дисертаційного дослідження з акумуляції органічного Карбону відображено у двох статтях категорії «Б». У статті Д. Ю. Лелеки, І. М. Шпаківської та І. С. Пижика «Запаси органічного карбону в лісових екосистемах ВододільноВерховинського хребта (Українські Карпати)» представлено кількісні результати, що становлять центральну частину дисертації. У статті О. І. Леневиц та Д. Ю. Лелеки розглянуто морфологічні особливості лісової підстилки старовікових лісів.

Окремі складові дисертаційної роботи апробовано у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій упродовж 2023–2026 років.

Представлено результати щодо загальних запасів органічного Карбону, його вмісту в підстилці та ґрунті, ролі ґрунтової біоти, емісії CO₂ з поверхні ґрунту та змін ґрунтового Карбону під впливом суцільних рубок. Позитивно слід оцінити наявність одноосібних праць Д. Ю. Лелеки, у яких висвітлено результати дослідження загальних запасів органічного Карбону, підстилки та ґрунту.

Таким чином, основні результати дисертаційної роботи достатньою мірою висвітлено у наукових публікаціях та апробовано на наукових конференціях.

Питання для наукової дискусії

1. Одним із найвиразніших результатів роботи є сильний позитивний зв'язок між віком деревостанів і сумарними запасами органічного Карбону. Як, на Вашу думку, змінюється сама структура вуглецевого резервуару в процесі старіння лісу: чи відбувається поступове зміщення ролі від живої фітомаси до мертвої деревини, підстилки та ґрунту?
2. Ви встановили суттєво більші запаси Карбону у фітомасі південного макросхилу, тоді як для ґрунтового пулу спостерігається протилежна

тенденція – дещо більші запаси на північному макросхилі. Якими екологічними механізмами Ви пояснюєте таку різноспрямовану реакцію надземного та ґрунтового пулів Карбону?

3. Грубі деревні залишки характеризувалися особливо високою варіабельністю запасів Карбону — від 0,86 до 85,60 т·га⁻¹. Чи можна розглядати цю мінливість не просто як просторову неоднорідність, а як відображення різних фаз природної динаміки старовікового лісу? І чи може запас мертвої деревини бути індикатором певної стадії цієї динаміки?
4. У дисертації ґрунт розглядається як найбільш стабільний довготривалий резервуар органічного Карбону. Водночас старовіковий ліс є динамічною системою, де Карбон постійно надходить у ґрунт і мінералізується. Які процеси, на Вашу думку, найбільшою мірою визначають баланс між стабілізацією та мінералізацією органічної речовини саме в досліджених лісах?
5. Окремий блок роботи присвячено ґрунтовій мезофауні як біотичному чиннику трансформації органічної речовини. Наскільки, на Вашу думку, структура ґрунтової мезофауни може бути використана не лише для пояснення процесів трансформації органічної речовини, а й як біоіндикатор функціонального стану вуглецевого циклу старовікових лісів?
6. У вибірці представлені як старовікові ліси, так і природні деревостани, які за структурними характеристиками наближаються до старовікового стану. Які характеристики вуглецевого циклу Ви вважаєте найперспективнішими для визначення того, що ліс функціонально вже наблизився до старовікового стану?
7. Результати роботи пропонується використовувати для оцінювання втрат Карбону в господарських лісах, а старовікові ліси — як референтні екосистеми. Якщо перенести результати дисертації у практичну площину, які характеристики лісу Ви вважали б пріоритетними для моніторингу відновлення його вуглецедепонувальної функції після припинення або зменшення господарського впливу?

Загальний висновок

Дисертаційна робота Лелеки Дмитра Юрійовича «Акумуляція органічного Карбону у старовікових лісах Вододільно Верховинського хребта (Українські Карпати)» є завершеною самостійною кваліфікаційною науковою працею.

Основною перевагою роботи є комплексне дослідження чотирьох функціонально різних карбонових пулів на системі з 26 пробних площ і статистичний аналіз їх просторової мінливості.

Автором не лише встановлено кількісні характеристики запасів органічного Карбону, але й показано принципово різний характер їх формування у фітомасі, грубих деревних залишках, підстилці та ґрунті.

Результати дисертації є обґрунтованими достатнім обсягом фактичного матеріалу, мають наукову новизну та практичне значення.

Основні положення дисертаційного дослідження оприлюднено у фахових наукових виданнях та апробовано на міжнародних і всеукраїнських

конференціях. Наявність публікацій у виданнях, представлених у базах Scopus та Web of Science Core Collection, позитивно характеризує загальну наукову підготовку здобувача.

Дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, а **Лелека Дмитро Юрійович** заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю **101 Екологія**, галузь знань **10 Природничі науки**.

Офіційний опонент

доктор біологічних наук, професор



Олександр ЖУКОВ