

АНОТАЦІЯ

Лелека Дмитро Юрійович. **Акумуляція органічного Карбону у старовікових лісах Вододільно-Верховинського хребта (Українські Карпати).** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 Екологія галузі знань 10 Природничі науки.

Робота виконана в Інституті екології Карпат Національної академії наук України. Захист дисертації проводиться в Інституті екології Карпат Національної академії наук України, м. Львів, 2026.

Дисертаційну роботу присвячено дослідженню закономірностей акумуляції органічного Карбону в старовікових лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта Українських Карпат, оцінюванню його запасів в основних компонентах лісових екосистем та особливостей мінералізації органічної речовини, а також встановленню впливу абіотичних і біотичних чинників на формування та просторовий розподіл вуглецевих резервуарів.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю поглиблення наукових знань про роль старовікових лісів у глобальному та регіональному циклах Карбону. В умовах кліматичних змін особливого значення набуває оцінювання здатності природних екосистем акумулювати та тривало утримувати органічний Карбон. Лісові екосистеми Українських Карпат є важливими природними резервуарами Карбону, однак закономірності формування та просторового розподілу його запасів у різних компонентах старовікових лісів досліджено недостатньо. Особливо це стосується природних лісів Вододільно-Верховинського хребта, представлених старовіковими буковими, ялицево-буковими і смереково-буковими деревостанами, а також природними лісами, які за структурними характеристиками наближаються до старовікового стану.

Метою роботи було встановити особливості формування та просторового розподілу запасів органічного Карбону в основних компонентах старовікових лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта, оцінити процеси його акумуляції та

мінералізації, визначити вплив природних чинників на формування вуглецевих резервуарів цих екосистем.

Об'єкт дослідження – процеси акумуляції та мінералізації органічного Карбону в старовікових лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта.

Предмет дослідження – запаси органічного Карбону у фітомасі, грубих деревних залишках, лісовій підстилці та ґрунті, закономірності їх просторового розподілу та зміни під впливом екологічних чинників.

Для досягнення поставленої мети використано комплекс польових, лабораторних, статистичних і геоінформаційних методів дослідження. Польові роботи виконано на 26 дослідних ділянках, закладених у межах старовікових природних лісів та природних деревостанів, які за своїми структурними характеристиками наближаються до старовікового стану, у межах Вододільно-Верховинського хребта. Оцінено запаси органічного Карбону в чотирьох основних блоках лісових екосистем: фітомасі, грубих деревних залишках, лісовій підстилці та ґрунті. Запаси Карбону визначали на основі лісотаксаційних даних, польових вимірювань і лабораторного аналізу зразків ґрунту та підстилки. Для встановлення закономірностей просторової мінливості показників та їх зв'язку з екологічними чинниками застосовано статистичні та геоінформаційні методи аналізу.

Середні запаси органічного Карбону у фітомасі становили $179,79 \pm 94,40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Встановлено значну просторову мінливість цього показника: діапазон значень становив від 33,01 до $374,29 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Виявлено істотні відмінності між південним і північним макросхилами Вододільно-Верховинського хребта. Для південного макросхили середні запаси органічного Карбону у фітомасі становили $241,78 \pm 85,44 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, тоді як для північного – $103,97 \pm 45,60 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Отримані результати свідчать про вирішальне значення віку деревостанів і ступеня природності лісових екосистем для формування вуглецевого резервуару.

Дослідження грубих деревних залишків показало, що вони є важливим компонентом довготривалого депонування органічного Карбону. Запаси органічного Карбону в цьому блоці змінювалися від 0,86 до $85,60 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а середнє значення становило $26,12 \pm 27,38 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Висока варіабельність показників пояснюється

природною мозаїчністю старовікових лісів, різною інтенсивністю накопичення деревного детриту та неоднаковою швидкістю його розкладу. Водночас статистично значущих відмінностей між макросхилами за цим показником не встановлено.

Запаси органічного Карбону в лісовій підстилці змінювалися від 2,85 до 10,59 т·га⁻¹, а середнє значення становило $6,75 \pm 1,82$ т·га⁻¹. У старовікових лісах південного макросхилу встановлено вищі значення запасів органічного Карбону в підстилці порівняно з північним макросхилом. Це пов'язано зі значним віком деревостанів, більшою продукцією органічного опаду та особливостями процесів його трансформації.

Ґрунт визначено як найбільш стабільний резервуар органічного Карбону в довготривалій перспективі. Запаси ґрунтового органічного Карбону коливалися від 20,22 до 65,86 т·га⁻¹, а середнє значення становило $33,93 \pm 9,36$ т·га⁻¹. Виявлено тенденцію до більших запасів органічного Карбону в ґрунтах північного макросхилу, однак статистично значущих відмінностей між макросхилами не встановлено. Отримані результати підтверджують високу стабільність ґрунтового пулу Карбону та його важливе значення для підтримання вуглецевого балансу лісових екосистем.

Сумарні запаси органічного Карбону в досліджених старовікових лісах становили від 65,83 до 468,01 т·га⁻¹. Середнє значення на всіх дослідних ділянках становило 232,36 т·га⁻¹. Для південного макросхилу середні сумарні запаси досягали 303,10 т·га⁻¹, тоді як для північного – 161,43 т·га⁻¹. Встановлено статистично значущу різницю між макросхилами та сильний позитивний зв'язок між запасами органічного Карбону й віком деревостанів ($r = 0,88$; $p < 0,001$).

Отримані результати підтверджують, що старовікові ліси мають значно вищий потенціал акумуляції та утримання органічного Карбону порівняно з господарськими лісами. Вони виконують роль довготривалих природних резервуарів Карбону та забезпечують стабільність біогеохімічних процесів у гірських екосистемах. Високі запаси органічної речовини у фітомасі, грубих деревних залишках, підстилці та ґрунті свідчать про ефективне функціонування природних механізмів секвестрування Карбону.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше здійснено комплексне оцінювання запасів органічного Карбону в основних компонентах старовікових лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта та встановлено особливості їхнього просторового розподілу. Визначено внесок окремих блоків екосистем у формування загального вуглецевого резервуару, встановлено закономірності накопичення органічного Карбону залежно від віку деревостанів, особливостей макросхилів та структури природних лісових угруповань. Отримано нові дані про роль грубих деревних залишків і ґрунту як довготривалих резервуарів Карбону в природних гірських лісах Українських Карпат. Загалом встановлено основні групи ґрунтової мезофауни, які забезпечують трансформацію органічного карбону та його наступну акумуляцію у ґрунтовому профілі.

Теоретичне значення роботи полягає в розвитку наукових уявлень про функціонування біогеохімічного циклу Карбону в природних лісових екосистемах, удосконаленні підходів до оцінювання запасів органічного Карбону та поглибленні знань про роль старовікових лісів у регулюванні кліматичних процесів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості використання старовікових природних лісів Вододільно-Верховинського хребта як референтних екосистем для оцінювання втрат органічного Карбону в господарських лісах, побудови регіональних моделей карбонового балансу, обґрунтування природоорієнтованих заходів пом'якшення змін клімату та вдосконалення системи моніторингу вуглецевих резервуарів. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення природоохоронних заходів, удосконалення практик сталого лісокористування та проведення оцінювання вуглецевих резервуарів лісових екосистем.

Проведене дослідження підтверджує, що збереження старовікових природних лісів Українських Карпат є одним із найбільш ефективних природоорієнтованих механізмів пом'якшення змін клімату. Високий рівень депонування органічного Карбону в цих екосистемах обґрунтовує необхідність їх подальшої охорони, розширення природоохоронних територій і використання як еталонних об'єктів для оцінювання стану лісових екосистем Українських Карпат.

Ключові слова: *органічний Карбон; старовікові ліси; лісові екосистеми; ґрунти; ґрунтова біота; мезофауна; лісова рослинність; екологічні градієнти; декомпозиція варіації; висотна поясність; депонування вуглецю; лісівничо-таксаційні показники; лісорослинні умови; зміна клімату; Українські Карпати.*

ABSTRACT

Leleka Dmytro Yuriiovych. **Accumulation of Organic Carbon in Old-Growth Forests of the Vododilno-Verkhovynskyi Range (Ukrainian Carpathians).** – Qualification research paper, manuscript.

Dissertation submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 101 Ecology, Field of Knowledge 10 Natural Sciences.

The research was conducted at the Institute of Ecology of the Carpathians of the National Academy of Sciences of Ukraine. The dissertation defense will be held at the Institute of Ecology of the Carpathians of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, 2026.

The dissertation focuses on the patterns of organic carbon accumulation in old-growth forest ecosystems of the Vododilno-Verkhovynskyi Range in the Ukrainian Carpathians, the assessment of organic carbon stocks in the major components of forest ecosystems and the processes of organic matter mineralization, as well as the effects of abiotic and biotic factors on the formation and spatial distribution of carbon pools.

The relevance of the study is determined by the need to improve scientific understanding of the role of old-growth forests in global and regional carbon cycling. Under changing climatic conditions, assessing the capacity of natural ecosystems to accumulate and retain organic carbon over long periods is of particular importance. Forest ecosystems of the Ukrainian Carpathians represent important natural carbon reservoirs; however, the patterns governing the formation and spatial distribution of carbon stocks among the different components of old-growth forests remain insufficiently understood. This is particularly relevant to the natural forests of the Vododilno-Verkhovynskyi Range, which include old-growth beech, fir-beech, and spruce-beech stands, as well as natural forests whose structural characteristics are approaching old-growth conditions.

The aim of the study was to identify the patterns of formation and spatial distribution of organic carbon stocks among the major components of old-growth forest ecosystems of the Vododilno-Verkhovynskyi Range, assess the processes of carbon accumulation and mineralization, and determine the effects of natural factors on the formation of carbon pools in these ecosystems.

The object of the study was the processes of organic carbon accumulation and mineralization in old-growth forest ecosystems of the Vododilno-Verkhovynskyi Range.

The subject of the study comprised organic carbon stocks in phytomass, coarse woody debris, forest litter, and soil, as well as the patterns of their spatial distribution and variation under the influence of environmental factors.

A combination of field, laboratory, statistical, and geospatial methods was used to achieve the research objectives. Field studies were conducted at 26 research plots established in old-growth natural forests and in natural forest stands whose structural characteristics are approaching old-growth conditions within the Vododilno-Verkhovynskyi Range. Organic carbon stocks were assessed in four major ecosystem pools: phytomass, coarse woody debris, forest litter, and soil. Carbon stocks were estimated using forest inventory data, field measurements, and laboratory analyses of soil and litter samples. Statistical and geospatial methods were applied to identify patterns of spatial variability and relationships between the measured parameters and environmental factors.

Mean organic carbon stocks in phytomass amounted to $179.79 \pm 94.40 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Considerable spatial variability was observed, with values ranging from 33.01 to 374.29 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Significant differences were found between the southern and northern macroslopes of the Vododilno-Verkhovynskyi Range. Mean organic carbon stocks in phytomass reached $241.78 \pm 85.44 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ on the southern macroslope, compared with $103.97 \pm 45.60 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ on the northern macroslope. These results indicate the decisive role of stand age and the degree of forest ecosystem naturalness in the formation of carbon pools.

Coarse woody debris was shown to be an important component of long-term organic carbon storage. Organic carbon stocks in this pool ranged from 0.86 to 85.60 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$, with a mean value of $26.12 \pm 27.38 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. The high variability reflects the natural spatial heterogeneity of old-growth forests, differences in the accumulation of woody detritus, and variation in decomposition rates. No statistically significant differences in coarse woody debris carbon stocks were detected between the macroslopes.

Organic carbon stocks in forest litter ranged from 2.85 to 10.59 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$, with a mean value of $6.75 \pm 1.82 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Higher litter carbon stocks were recorded in old-growth forests of the southern macroslope compared with those of the northern macroslope. This pattern is

associated with greater stand age, higher organic litter inputs, and differences in the processes of litter transformation.

Soil was identified as the most stable long-term reservoir of organic carbon. Soil organic carbon stocks ranged from 20.22 to 65.86 t·ha⁻¹, with a mean value of 33.93 ± 9.36 t·ha⁻¹. A tendency toward higher soil organic carbon stocks was observed on the northern macroslope, although the differences between macroslopes were not statistically significant. The results confirm the high stability of the soil carbon pool and its important role in maintaining the carbon balance of forest ecosystems.

Total organic carbon stocks in the studied old-growth forests ranged from 65.83 to 468.01 t·ha⁻¹. The mean value across all research plots was 232.36 t·ha⁻¹. Mean total carbon stocks reached 303.10 t·ha⁻¹ on the southern macroslope and 161.43 t·ha⁻¹ on the northern macroslope. A statistically significant difference between the macroslopes was established, together with a strong positive relationship between organic carbon stocks and stand age ($r = 0.88$; $p < 0.001$).

The results demonstrate that old-growth forests have a substantially greater capacity to accumulate and retain organic carbon than managed forests. They function as long-term natural carbon reservoirs and contribute to the stability of biogeochemical processes in mountain ecosystems. High organic carbon stocks in phytomass, coarse woody debris, forest litter, and soil indicate the effective functioning of natural carbon sequestration mechanisms.

The scientific novelty of the study lies in the first comprehensive assessment of organic carbon stocks in the major components of old-growth forest ecosystems of the Vododilno-Verkhovynskyi Range and in the identification of their spatial distribution patterns. The contribution of individual ecosystem pools to the total carbon reservoir was determined, and patterns of organic carbon accumulation in relation to stand age, macroslope characteristics, and the structure of natural forest communities were identified. New data were obtained on the role of coarse woody debris and soil as long-term carbon reservoirs in natural mountain forests of the Ukrainian Carpathians.

The theoretical significance of the study lies in advancing scientific understanding of carbon biogeochemical cycling in natural forest ecosystems, improving approaches to the

assessment of organic carbon stocks, and expanding knowledge of the role of old-growth forests in the regulation of climate-related processes.

The practical significance of the results lies in the possibility of using old-growth natural forests of the Vododilno-Verkhovynskyi Range as reference ecosystems for assessing organic carbon losses in managed forests, developing regional carbon balance models, substantiating nature-based climate change mitigation measures, and improving carbon pool monitoring systems. The results may also be used in the development of conservation measures, the improvement of sustainable forest management practices, and the assessment of carbon pools in forest ecosystems.

The study confirms that the conservation of old-growth natural forests in the Ukrainian Carpathians is one of the most effective nature-based mechanisms for climate change mitigation. The high level of organic carbon storage in these ecosystems supports the need for their continued protection, the expansion of protected areas, and their use as reference ecosystems for assessing the condition of forest ecosystems in the Ukrainian Carpathians.

Keywords: *organic carbon; old-growth forests; forest ecosystems; soils; soil biota; mesofauna; forest vegetation; environmental gradients; variation partitioning; altitudinal zonation; carbon storage; forest inventory characteristics; forest site conditions; climate change; Ukrainian Carpathians.*