

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕКОЛОГІЇ КАРПАТ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця

на правах рукопису

ЛЕЛЕКА ДМИТРО ЮРІЙОВИЧ

УДК 574.4:630*1:631.417(477.8:292.452)

ДИСЕРТАЦІЯ

АКУМУЛЯЦІЯ ОРГАНІЧНОГО КАРБОНУ У СТАРОВІКОВИХ ЛІСАХ
ВОДОДІЛЬНО-ВЕРХОВИНСЬКОГО ХРЕБТА (УКРАЇНСЬКІ КАРПАТИ)

101 - Екологія

10 – Природничі науки

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

Д. Ю. Лелека



Науковий керівник

Шпаківська Ірина Миронівна

кандидат біологічних наук,

старший науковий співробітник

Львів – 2026

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 макросхилю 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 макросхилю, 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 макросхилю 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.*

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»)

1. Лелека Д. Ю., Шпаківська І. М., Пижик І. С. Запаси органічного карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта (Українські Карпати). **Біорізноманіття, екологія та експериментальна біологія**. 2024. Т. 26, № 2. С. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.34142/2708-5848.2024.26.2.02>. (*Особистий внесок - збір матеріалів, візуалізація даних, камеральна обробка матеріалів, написання частин тексту*).
2. Лєневич О. І., Лелека Д. Ю. Морфологічні особливості лісової підстилки старовікових лісів на природно-заповідних територіях Західних регіонів України. **Науковий вісник НЛТУ України**. 2024. Т. 34, № 8. С. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.36930/40340810>. (*Особистий внесок - збір матеріалів, часткова камеральна обробка, написання частин тексту*).

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

3. Novikov A., Rizun V., Susulovsky A., Hushtan H., Hushtan K., Kuzyarin O., Savytska A., Nachychko V., Susulovska S., Leleka D. Data mobilisation at the Fund of Invertebrates of the State Museum of Natural History of the NAS of Ukraine. **Biodiversity Data Journal**. 2024. Vol. 12. e131188. DOI: <https://doi.org/10.3897/BDJ.12.e131188>. (*Особистий внесок - апробація оцифрування колекцій бехребетних*).
4. Novikov A., Savytska A., Kuzyarin O., Nachychko V., Susulovska S., Rizun V., Susulovsky A., Hushtan H., Hushtan K., Leleka D. Data mobilisation in the LWS Herbarium: success and prospects. **Biodiversity Data Journal**. 2024. Vol. 12. e117292. DOI: <https://doi.org/10.3897/BDJ.12.e117292>. (*Особистий внесок - апробація оцифрування колекцій гербарію*).
5. Rizun V., Novikov A., Hushtan K., Hushtan H., Kuzyarin O., Savytska A., Susulovskyi A., Susulovska S., Leleka D., Nachychko V. Rare component of biota in the Data Centre “Biodiversity of Ukraine” and its possible use to identify hotspot

areas and evaluation of biodiversity. **Biosystems Diversity**. 2024. Vol. 32, No. 3. P. 334–344. DOI: <https://doi.org/10.15421/012436>. (Особистий внесок - опрацювання бази даних, редагування тексту).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Лелека Д. Ю., Гуштан Г. Г. Роль панцирних кліщів (Acari: Oribatida) у колообігу вуглецю природних екосистем. *Актуальні проблеми вивчення ентомофауни західного регіону України : збірник тез науково-практичної конференції* (Броди, 16–18 червня 2023 р.). Львів : Державний природознавчий музей НАН України, 2023. С. 33–34. URL: https://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/29291/1/Holinei_et_al_aktual_prob_lem.pdf. **истий** (Особистий внесок 80%: написання тексту, опрацювання літератури).
7. Лелека Д. Ю., Шпаківська І. М., Пижик І. С. Акумуляція органічного Карбону у старовікових лісах Вододільно-Верховинського хребта (Українські Карпати). *Natural Sciences: History, the Present Time, the Future, EU Experience : International Scientific Conference*. Wloclawek, 2023. P. 51–54. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-344-6-12>. (Особистий внесок 60%: написання частин тексту, візуалізація даних, збір матеріалів, камеральна обробка, опрацювання літературних джерел).
8. Шпаківська І. М., Марискевич О. Г., Башта А.-Т. В., Гірна А. Я., Канарський Ю. В., Лелека Д. Ю., Леневи́ч О. І., Пижик І. С., Царик І. Й., Яворницький В. І., Януль В. С., Ященко П. Т. Теоретико-методологічні засади та пілотні дослідження старовікових лісів на території Національного природного парку «Бойківщина». *Роль біосферних заповідників (резерватів) та інших природоохоронних територій для реалізації в Україні стратегії сталого розвитку : матеріали міжнародної науково-практичної конференції* (Рахів, 21 листопада 2023 р.). Рахів, 2023. С. 334–341. (Особистий внесок 7%: написання частин тексту, опрацювання літературних джерел камеральна обробка, частковий збір матеріалів).

9. Лелека Д. Ю. Пілотні дослідження запасів органічного Карбону в екосистемах старовікових лісів Вододільно-Верховинського хребта (Українські Карпати). *Молодь і поступ біології : збірник тез доповідей XX Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів* (Львів, 18–20 квітня 2024 р.). Львів : Сполом, 2024. С. 205–206. URL: https://bioweb.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/04/Zbirnyk-Molod-i-postup-biologhii-2024_.pdf. (Особистий внесок 100%: написання тексту, збір матеріалів, опрацювання літературних джерел, камеральна обробка).
10. Башта А.-Т. В., Гірна А. Я., Канарський Ю. В., Лелека Д. Ю., Леневи́ч О. І., Царик І. Й., Шпаківська І. М., Яворницький В. І., Януль В. С., Ященко П. Т. Дослідження на постійній пробній площі. *Літопис природи Національного природного парку «Бойківщина»*. Т. 3. 2023 р. Бориня, 2024. С. 105–114. (Особистий внесок 10%: написання частин тексту, частковий збір матеріалів, камеральна обробка).
11. Leleka D. Organic Carbon Storage in the Litter of Old-Growth Forests of the Vododilno-Verkhovynskyi Range (Ukrainian Carpathians). *Ecology is a Priority : All-Ukrainian English-Speaking Student Conference* (Kharkiv, March 14, 2025). Kharkiv, 2025. P. 63–64. URI: <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/20978>. (Особистий внесок 100%: написання тексту, збір матеріалів, опрацювання літературних джерел, камеральна обробка).
12. Гамкало З. Г., Лелека Д. Ю., Пижик І. С., Шпаківська І. М., Ященко П. Т. Вдосконалення теоретико-методологічного і методичного підходів до оцінки емісії CO₂ з поверхні ґрунту лісової екосистеми. *Регіональні аспекти флористичних і фауністичних досліджень : матеріали Сьомої міжнародної науково-практичної конференції* (сел. Путила, Чернівецька обл., 4–5 червня 2025 р.). Чернівці : Друк Арт, 2025. С. 99–100. URL: https://cheremoskyi-park.in.ua/wp-content/uploads/2025/12/zbirka-materialiv-7-konf-2025-rik.-Rehionalni-aspekty-2025-r._134-st.pdf. (Особистий внесок 20%: частковий збір матеріалів)

13. Пижик І. С., Лелека Д. Ю., Пука Є. О. Вплив суцільних рубок на запаси органічного карбону в ґрунтах гірських лісових екосистем Львівщини. *Генеза, географія та екологія ґрунтів : збірник наукових праць*. 2025. Вип. 7. С. 192–200. URL: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/11/Povidomlennia-Zbirnyk-do-Pozniaka-2025.pdf>. (Особистий внесок 30%: написання частин тексту, частковий збір матеріалів, часткова камеральна обробка).
14. Leleka D. Yu. Study of Organic Carbon Stocks in the Soil of Old-Growth Forests of the Vododilno-Verkhovynskyi Ridge. *Ecology is a Priority : All-Ukrainian Student English-Speaking Conference with International Participation* (Kharkiv, March 11, 2026). Kharkiv : V. N. Karazin Kharkiv National University, 2026. P. 38–39. URI: <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/25653>. (Особистий внесок 100%: написання тексту, збір матеріалів, опрацювання літературних джерел, камеральна обробка).

Інші публікації здобувача

15. Гуштан Г.Г., Гуштан К.В., Лелека Д.Ю. 2024. Оцифрування колекції мікропрепаратів панцирних кліщів (Acari: Oribatida) з використанням різних типів фотосистем. Актуальні проблеми вивчення ентомофауни західного регіону України: збірник тез науково-практичної конференції (Івано-Франківськ – Стара Гута, 14-16 червня 2024 р.). — Львів: Державний природознавчий музей НАН України. – 17 с. [Електронне видання] <https://synyogora-park.in.ua/wp-content/uploads/2024/04/Zbirnyk-II-chytannia-23042024.pdf> (Особистий внесок 30%: апробація оцифрування мікропрепаратів, написання частин тексту, редагування тексту).
16. Новіков А. та ін. Оцифрування уразливих природничих колекцій. Zenodo. 2023. DOI: 10.5281/zenodo.10251788. (Особистий внесок 7%: апробація оцифрування природничих колекцій).
17. Hushtan H., Hushtan K., Leleka D. Oribatid mites (Sarcoptiformes: Oribatida) of the Lviv region. GBIF occurrence dataset. 2023. DOI: 10.15468/hzpgpm. (Особистий внесок 30%: оцифрування колекцій, підготовка частини датасету).

18. **Rizun V. et al.** SMNH NASU Invertebrates collection. GBIF occurrence dataset. 2024. DOI: 10.15468/ugtaz7. (*Особистий внесок 8%: оцифрування колекцій, підготовка частини датасету*).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І АБРЕВІАТУР	17
ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1. ДЕПОНУВАННЯ ОРГАНІЧНОГО КАРБОНУ ЛІСОВИМИ ЕКОСИСТЕМАМИ ЯК ІНТЕРГАЛЬНИЙ ПОКАЗНИК БІОСФЕРНОЇ РОЛІ ЛІСІВ	28
1.1 Історія дослідження органічного Карбону у світі.....	29
1.2. Історія дослідження органічного Карбону в Україні	28
1.3. Стан вивченості та перспективи.	34
1.4. Проблематика зміни клімату. Біотичний цикл органічного карбону в біосфері. Роль лісових екосистем у контролі рівня CO ₂	35
1.5. Дослідження органічного Карбону в гірських екосистемах.....	41
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ФОРМУВАННЯ СТАРОВІКОВИХ ЕКОСИСТЕМ ВОДОДІЛЬНО-ВЕРХОВИНСЬКОГО ХРЕБТА	49
2.1. Фізико-географічна характеристика території досліджень	49
2.2. Клімат	52
2.3 Ґрунти району дослідження Вододільно-Верховинського хребта.....	60
2.4. Рослинний покрив району дослідження Вододільно-Верховинського хребта....	64
РОЗДІЛ 3. ДІЛЯНКИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	73
3.1 Ділянки досліджень.....	73
3.2 Методи досліджень	93
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРАНСФОРМАЦІЇ ОРГАНІЧНОГО КАРБОНУ В ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ ВОДОДІЛЬНО-ВЕРХОВИНСЬКОГО ХРЕБТА	100
4.1 Статистична характеристика запасів Органічного Карбону блоку фітомаси в досліджуваних лісових екосистем Вододільно-Верховинського Хребта.	100
4.2 Характеристика запасів блоку грубих деревних залишків () і запасів Органічного Карбону в цьому блоці досліджуваних лісових екосистем Вододільно- Верховинського Хребта.	102
4.3 Характеристика запасів блоку підстилки та запасів Органічного Карбону в цьому блоці досліджуваних лісових екосистем Вододільно-Верховинського Хребта.	109
4.4 Характеристика запасів блоку ґрунту та запасів Органічного Карбону в цьому блоці досліджуваних лісових екосистем Вододільно-Верховинського Хребта.	115
4.5 Загальна характеристика запасів Органічного Карбону та запасів органіки в досліджуваних лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта.....	122

4.6. Ґрунтова мезофауна як біотичний чинник трансформації органічної речовини ключових ділянок стровікових лісів	127
РОЗДІЛ 5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	134
5.1. Загальні закономірності акумуляції органічного карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта.....	134
5.2. Вплив експозиції макросхилів на запаси органічного карбону	141
5.3. Роль вікової структури лісів у формуванні пулів органічного карбону.....	145
5.4. Індивідуальні та екстремальні випадки	149
5.5. Порівняння результатів запасів органічного Карбону ділянок досліджень Вододільно-Верховинського хребта з іншими регіонами Карпат.	151
5.5.1. Сколівські Бескиди (Україна)	152
5.5.2. Польські Бескиди.....	152
5.5.3. Словацькі Карпати.....	157
5.5.3. Румунські Карпати	159
ВИСНОВКИ.....	164
Список використаних джерел	168
Додатки.....	187

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І АБРЕВІАТУР

(Coarse Woody Debris) – грубі деревні залишки

DBH (Diameter at Breast Height) – діаметр стовбура на висоті 1,3 м

GPS (Global Positioning System) – глобальна система позиціонування

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) – Міжурядова група експертів із змін клімату

SOC (Soil Organic Carbon) – ґрунтовий органічний Карбон

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) – Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату

БПП – біологічна продуктивність пралісів

ВВХ – Вододільно-Верховинський хребет

ДП «Ліси України» – Державне спеціалізоване господарське підприємство «Ліси України»

ДПМ НАН України – Державний природознавчий музей Національної академії наук України

ІЕК НАН України – Інститут екології Карпат Національної академії наук України

НАН України – Національна академія наук України

НПП – національний природний парк

ООПТ – особливо охоронювана природна територія

ПЗФ – природно-заповідний фонд

ППП – постійна пробна площа

CO₂ – діоксид Карбону

т·га⁻¹ – тонн на гектар

т·га⁻¹·рік⁻¹ – тонн на гектар за рік

pH – водневий показник кислотності

% C – вміст органічного Карбону у відсотках

±SD – стандартне відхилення

±SE – стандартна похибка середнього

R² – коефіцієнт детермінації

p – рівень статистичної значущості

rs – коефіцієнт рангової кореляції Спірмена

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми досліджень. Біосферна роль лісових екосистем полягає в стабілізації рівня атмосферного CO₂ та визначається кількісним і якісним складом органічної речовини, що акумульована в окремих блоках: фітомасі, фітодетриті та гумусі ґрунту. За масштабами поглинання Карбону і, особливо, за розмірами його тривалого акумулювання, ліси визнаються найбільш надійною системою запобігання парникового ефекту. Враховуючи фундаментальну роль ґрунтового покриву у функціонуванні різнорівневих екосистем, вбачаємо необхідність посиленої уваги до ґрунту як одного з найбільших планетарних резервуарів Карбону, в якому зосереджено 2300 Гт С, що перевищує сумарний запас цього елемента в атмосфері майже в три рази (800 Гт С) та у фітомасі майже у п'ять разів (550 Гт С) (Lal R., 2004). Лісові екосистеми є найбільш потужним регулятором біогеохімічного циклу Карбону та пов'язаного з ним температурного режиму атмосфери, тому лісовий покрив належить до основних факторів забезпечення стійкості та стабільності функціонування наземних екосистем. У зв'язку з цим важливим є встановлення антропогенної трансформації біогеохімічного циклу Карбону, яке може бути здійснене з використанням теоретичних засад біотичної регуляції глобального циклу Карбону на регіональному рівні (Lal R., 2004).

Старовікові ліси й праліси – це лісові екосистеми, які тривалий час розвивалися природним шляхом, у яких біотоп і – особливо – біоценоз не зазнав істотного антропогенного впливу на структуру, динаміку біомаси, вікову структуру едифікаторів, природне відновлення екосистеми, її системну цілісність, які потенційно здатні до самопідтримання шляхом саморегулювання в разі відсутності руйнівного впливу людини або за умови відновлення первинних екологічних умов їхнього функціонування (Волосянчук та ін. 2017). До старовікових лісів і пралісів належать екосистеми з комплексними структурами, які включають усі стадії розвитку лісового угруповання (деякі стадії можуть бути наявні лише на невеликих площах) у мозаїчній горизонтальній (парцелярній), а також віковій структурах. Праліси – це лісові екосистеми (угруповання), які виникли й розвиваються природним шляхом під впливом лише природних стихій та явищ і пройшли повний цикл розвитку без

істотного втручання людини, видова, вікова й просторова структури яких визначаються лише чинниками природного середовища. Згідно з пропозиціями Всесвітнього Фонду Природи (WWF) і Міжнародного Союзу Охорони Природи (МСОП), до старовікових, або первинних лісів, зараховують такі, які не зазнали змін під впливом людини (Волосянчук та ін. 2017).

Старовікові ліси є важливими зразками особливо цінних лісів в Україні та у всьому світі. У проєкті Національного стандарту з управління лісами FSC для України зазначено, що старовікові ліси належать до Категорії 3 (рідкісні, зникаючі, або такі, що перебувають під загрозою зникнення екосистеми та типи оселищ) з точки зору Високої цінності для збереження (Принцип 9). Отже, такі ліси є також одними з найкращих кандидатів для Репрезентативних територій (Принцип 6).

Поглинання з атмосфери діоксиду вуглецю пов'язане з потенційними можливостями лісових екосистем до його акумулювання, передовсім з ресурсним потенціалом – площами лісових земель, їхнім просторовим розташуванням, породним складом і продуктивністю. Ці показники, як і фітосанітарний стан лісів, є одними з важливих характеристик їхньої ролі в циклі Карбону. Україна долучилася до міжнародних угод з питань регулювання змін клімату та зменшення кількості парникових газів. Одним із найважливіших документів у цій галузі є Кіотський протокол, який Верховна Рада України ратифікувала 4 лютого 2004 року (Закон України від 04.02.2004 №1430-IV «Про ратифікацію Кіотського протоколу до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату»), чим взяла на себе зобов'язання перед світовою спільнотою не перевищувати рівень викидів парникових газів базового 1990 року. Приймавши міжнародні зобов'язання, згідно з Кіотським протоколом, Україна повинна вести щорічний кадастр чистих змін викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів, які є прямим результатом діяльності людини у сфері змін землекористування й у лісовому господарстві, починаючи з 1990 року. Під час таких оцінок слід враховувати обсяги викидів і поглинання парникових газів, лісовідновлення, заліснення та ведення лісового господарства.

Величина запасів органічного Карбону в лісових екосистемах і характер його формування визначаються як природними, так і антропогенними факторами.

Природні чинники формуються в процесі еволюції ландшафтів, їхня динаміка залежить від регіональних проявів ослаблення та розпаду деревостанів і морфодинамічних процесів. Антропогенне втручання може істотно змінювати величину депонування Карбону за рахунок лісокористування, зміни землекористування. Узагальнюючим (інтегральним) параметром глибини антропогенної трансформації циклу Карбону окремих фізико-географічних районів вважають зменшення величини сучасного депонування (стоку) Карбону, детермінованої абіотичними екологічними факторами території, такими як рельєф, клімат і ґрунтоутворюючі породи.

На запаси та динаміку основних пулів Карбону лісовкритих територій істотно впливають такі чинники: інтенсивність використання лісів, обсяги їхнього відтворення, охорона від пожеж, захист від шкідників і хвороб.

У регіональному аспекті лісові екосистеми є важливими резервуаром нагромадження Карбону та зменшення його антропогенного надходження внаслідок спалювання викопного палива й промислових емісій. Проте, ліси, внаслідок їхнього вирубування, пожеж, інвазії шкідників і хвороб лісу, можуть бути також джерелами надходження Карбону до атмосфери (Пижи́к І. С., та ін., 2022). Вдосконалення системи ведення лісового господарства та запровадження принципів наближеного до природи лісівництва, їхня охорона від пожеж, фітофагів і хвороб лісу призводить до значного зменшення загального рівня емісії Карбону, який виділяється лісами (Шпаківська та ін., 2013). Важливою екологічною функцією лісів вважають депонування Карбону атмосфери й довготривале його секвестрування в стовбуровій деревині, підстилці та гумусованих горизонтах ґрунту. Ці процеси корелюються з продуктивністю лісових насаджень, їхніми запасами, бонітетами, типами лісорослинних умов. З огляду на це, є потреба в розробці й застосуванні заходів, спрямованих на збільшення продуктивності лісів внаслідок лісогосподарської діяльності, з метою покращення їхньої карбондепонуючої функції (Лакида та ін., 2008).

Зважаючи на потребу регіональних оцінок депонування вуглецю та встановлення ролі лісових екосистем у зв'язуванні діоксиду карбону атмосфери,

впродовж останніх років в Україні проводили низку досліджень у різних регіонах з розрахунком величини акумуляції органічного Карбону лісовими насадженнями (Лакида та ін., 2011). Проте, у переважній більшості з них детально вивчено акумулювання органічного вуглецю в розрізі адміністративних територіальних одиниць або лише надземною частиною фітомаси деревного ярусу. Тільки в роботах В. П.Пастернака здійснена комплексна оцінка депонування вуглецю в живій фітомасі, підстилці та стовбуровому фітодетриті лісів північного сходу України (Пастернак, 2011).

Незважаючи на численні дослідження лісових насаджень України та прогнозування їхньої ролі в пом'якшенні змін клімату, комплексних просторових оцінок депонування органічного вуглецю лісовими екосистемами за окремими фізико-географічними районами не проводили. Слід також зазначити, що сучасні екологічні дослідження потребують різних способів і засобів збирання даних, обробки інформації та інтерпретації кінцевих результатів. Сьогодні дослідження будь-яких процесів у лісових екосистемах потребують використання математичних моделей для прогнозування їхніх змін, а також застосування сучасних геоінформаційних технологій для отримання якісної картографічної основи для встановлення просторового розподілу запасів органічного Карбону та розроблення моделей часової динаміки внаслідок природних чи антропогенних впливів, динаміки певного процесу на даній території (Токар, 2015).

Створення таких моделей дає можливість вносити зміни в режимі реального часу й отримувати нові результати прогнозування, що робить використання математичного моделювання та ГІС технологій необхідною умовою при дослідженні запасів і динаміки органічного вуглецю в лісових екосистемах на території різних фізико-географічних регіонів Українських Карпат (Стрянець та ін., 2013).

Запропоновано в межах національної екологічної мережі переорієнтувати ведення лісового господарства на забезпечення екологічних пріоритетів – депонування вуглецю, продукування кисню, виконання гідрологічних функцій. Цього можна досягти лише шляхом встановлення вікової межі екологічної стиглості деревостанів ялиці білої та дуба звичайного понад 200 років, ялини європейської –

150 років, бука лісового – 120 років (Черневий, Третяк, 2010). Саме в цьому віці деревостанів показники приросту біомаси, депонування вуглецю, продукування кисню, використання води та транспірації є найвищими. Це має важливе значення і з економічної точки зору через вартість квот викидів і поглинання вуглецю: дохід від річного депонування вуглецю деревостанами старшого віку обсягом 5 т га за вартості квоти 10 € за тонну буде становити 50 € на рік з 1 га.

Актуальність роботи. У сучасних дослідженнях, присвячених екологічним наслідкам змін клімату, значну увагу приділяють глобальним і національним оцінкам та прогнозам змін вуглецевого балансу, зокрема в контексті реалізації положень Кіотського протоколу та Паризької угоди. Водночас значно менше досліджено регіональні закономірності акумуляції органічного Карбону в межах природних територіальних комплексів.

Запаси органічного Карбону в лісових екосистемах формуються під впливом комплексу абіотичних, біотичних і антропогенних чинників, дія яких має виразну регіональну специфіку. Особливе значення в цьому контексті мають старовікові ліси, які характеризуються тривалим природним розвитком, складною просторовою структурою та значними запасами органічної речовини у фітомасі, мертвій деревині, підстилці й ґрунті.

Для старовікових лісів Вододільно-Верховинського хребта комплексні оцінки запасів і просторового розподілу органічного Карбону в основних компонентах екосистем, а також закономірностей їх формування під впливом природних та антропогенних чинників залишаються недостатньо опрацьованими. Тому актуальним є встановлення величини та структури запасів органічного Карбону в цих екосистемах, з'ясування особливостей його просторового розподілу та оцінювання чинників, що визначають процеси його акумуляції.

Мета роботи - встановити закономірності формування та просторового розподілу запасів органічного Карбону в основних компонентах екосистем старовікових лісів Вододільно-Верховинського хребта.

Основні завдання:

- проаналізувати лісівничо-таксаційні характеристики старовікових деревостанів Вододільно-Верховинського хребта та встановити особливості формування запасів їхньої фітомаси;;
- визначити запаси органічного Карбону в основних компонентах лісових екосистем: фітомасі деревного, чагарникового й трав'яного ярусів, стовбуровому фітодетриті, лісовій підстилці та ґрунті;
- встановити особливості просторового розподілу запасів органічного Карбону в екосистемах старовікових лісів досліджуваної території;
- оцінити співвідношення запасів органічного Карбону в окремих компонентах старовікових лісових екосистем та їхній внесок у загальний запас Карбону;
- встановити особливості акумуляції органічного Карбону за різних типів і ступенів антропогенного впливу на лісові екосистеми;
- з'ясувати вплив комплексу абіотичних, біотичних і антропогенних чинників на формування та акумуляцію запасів органічного Карбону в екосистемах старовікових лісів Вододільно-Верховинського хребта.
- прогноз змін запасів органічного Карбону внаслідок експлуатації лісів чи запровадження природоохоронного режиму

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети та виконання завдань використано комплекс польових, лабораторних, лісотаксаційних, картографічних і статистичних методів дослідження.

Запаси органічного Карбону оцінювали в основних компонентах лісових екосистем: фітомасі деревного, чагарникового й трав'яного ярусів, мертвій деревині, лісовій підстилці та ґрунті. Лісівничо-таксаційні характеристики деревостанів визначали методом подеревної таксації на пробних площах із використанням технології Field-Mar. Запаси Карбону у фітомасі розраховували із застосуванням регіональних регресійних рівнянь і даних лісової інвентаризації.

Облік стовбурового фітодетриту проводили на закладених пробних площах із визначенням його кількісних характеристик і ступеня розкладу мертвої деревини. Запаси органічної речовини лісової підстилки оцінювали за результатами польового відбору зразків із використанням рамки відомої площі, визначення її потужності та маси. Ґрунтові зразки відбирали за генетичними горизонтами, а вміст органічного Карбону визначали лабораторними методами.

Для оцінювання просторового розподілу запасів органічного Карбону застосовували геоінформаційні технології та картографічні методи. Статистичне опрацювання отриманих результатів, аналіз взаємозв'язків між показниками та побудову моделей виконували із застосуванням програм PAST, R та MS Excel.

Описова статистика отриманих результатів і методи статистичного моделювання. Для статистичного аналізу отриманих даних використовувалися програми: “PAST” v. 5.0.2 і “R” v. 4.5.2 <https://www.statskingdom.com/>, а також програми пакету MS Office (MS Excel).

Наукова новизна — уперше комплексно оцінено запаси органічного Карбону в основних компонентах старовікових лісів Вододільно-Верховинського хребта; встановлено закономірності просторового розподілу, внесок окремих пулів у загальний запас, зв'язки з віком деревостанів, макросхилами та структурою природних угруповань; отримано нові дані щодо запасів Карбону в мертвій деревині та ґрунті.

Теоретичне значення. Результати дослідження поглиблюють уявлення про закономірності формування та просторового розподілу запасів органічного Карбону в екосистемах старовікових лісів Вододільно-Верховинського хребта, а також про роль абіотичних, біотичних і антропогенних чинників у процесах його акумуляції..

Об'єкт дослідження — процеси акумуляції та мінералізації органічного Карбону в цих екосистемах.

Предмет дослідження — запаси Карбону у фітомасі, грубому деревному детриті, лісовій підстилці та ґрунті, а також особливості їх просторової мінливості під впливом чинників середовища.

Практичне значення. Отримані результати можуть бути використані для уточнення регіональних оцінок запасів органічного Карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта та для оцінювання наслідків різних видів природних і антропогенних порушень. Встановлені закономірності формування й просторового розподілу запасів органічного Карбону в основних компонентах лісових екосистем можуть бути використані під час ведення лісового моніторингу, планування заходів зі збереження старовікових лісів та формування регіональних баз даних щодо запасів Карбону в лісових екосистемах Українських Карпат.

Результати досліджень використано під час підготовки матеріалів Літопису природи Національного природного парку «Бойківщина» за 2024 рік.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. Здобувачем проаналізовано наукову літературу за темою дослідження, сформульовано мету та основні завдання роботи, обґрунтовано програму досліджень і визначено методичні підходи до їх реалізації.

Здобувачем особисто проведено польові дослідження на території Вододільно-Верховинського хребта, закладено та обстежено 26 пробних площ, виконано лісотаксаційні вимірювання, проведено облік грубих деревних залишків, відібрано зразки лісової підстилки та ґрунту для лабораторних досліджень, також збору та первинного опрацювання матеріалу ґрунтової мезофауни

Автором здійснено опрацювання отриманих результатів, статистичний аналіз даних, статистичне моделювання та аналіз взаємозв'язків між досліджуваними показниками, підготовку картографічних матеріалів та інтерпретацію результатів дослідження.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить участь у постановці завдань дослідження, проведенні польових робіт, опрацюванні й аналізі отриманих результатів та підготовці матеріалів до друку.

Апробація результатів дослідження. Основні положення та результати дисертаційної роботи представлено й обговорено на міжнародних, всеукраїнських і регіональних наукових конференціях, зокрема:

– International Scientific Conference “Natural Sciences: History, the Present Time, the Future, EU Experience” (Włocławek, Польща, 2023);

– міжнародній науково-практичній конференції «Роль біосферних заповідників (резерватів) та інших природоохоронних територій для реалізації в Україні стратегії сталого розвитку» (Рахів, 2023);

– XX Міжнародній науковій конференції студентів і аспірантів «Молодь і поступ біології» (Львів, 2024);

– Всеукраїнській англomовній студентській конференції «Ecology is a Priority» (Харків, 2025, 2026);

– VII Міжнародній науково-практичній конференції «Регіональні аспекти флористичних і фауністичних досліджень» (Путила, 2025).

Результати дисертаційного дослідження також обговорювалися на наукових семінарах Інституту екології Карпат НАН України.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць; із них – 2 статті в наукових фахових виданнях України, 3 статті, що індексуються в наукометричних базах та 9 матеріалів доповідей на конференціях. Інші публікації додатково відображають наукові дослідження здлбувача.

Зв'язок з науковими програмами, темами, планами. Роботу було виконано в рамках базової бюджетної теми відділу екосистемології Інституту екології Карпат НАН України «Структурно-функціональна організація природних екосистем старовікових лісів як модель ренатуралізації трансформованих деревостанів західних регіонів України (державний реєстраційний номер 0123U100358)/

Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

Загальний обсяг дисертації становить 6,83 авторських аркушів. Робота містить 13 таблиць та 14 рисунків. Список використаних джерел налічує 175 найменувань, 98 з яких – латиницею.

РОЗДІЛ 1. ДЕПОНУВАННЯ ОРГАНІЧНОГО КАРБОНУ ЛІСОВИМИ ЕКОСИСТЕМАМИ ЯК ІНТЕРГАЛЬНИЙ ПОКАЗНИК БІОСФЕРНОЇ РОЛІ ЛІСІВ.

1.1. Історія дослідження органічного карбону у світі та Україні.

У ХХІ столітті вчені зосередили особливу увагу на глобальному вуглецевому циклі, адже накопичення двоокису вуглецю (CO_2) в атмосфері через діяльність людини спричиняє кліматичні зміни. Вже на початку століття провідні науковці дійшли висновку, що не існує природного «рятівника», здатного поглинути весь надлишковий CO_2 антропогенного походження – природні процеси можуть лише сповільнити зростання концентрацій, але не повністю його зупинити (Falkowski et al., 2000). Це усвідомлення стимулювало перехід від вивчення локальних процесів до комплексного вивчення глобального вуглецевого циклу, який пов'язує атмосферу, рослинність, ґрунти й океани. Відомі учені ХХІ століття, серед яких Мартін Хайманн, Маркус Райхштейн, Жозеп Канаделл, Корінн Ле Кере, Сюзен Трамбор та Раттан Лал, об'єднали зусилля для дослідження кругообігу органічного вуглецю і його взаємозв'язку з кліматом планети.

Ґрунти містять найбільший наземний резервуар органічного вуглецю – за оцінками, понад утричі більше, ніж атмосфера або жива біомаса (Schmidt et al., 2011). Отже, навіть незначні зміни в балансі ґрунтового вуглецю можуть суттєво вплинути на концентрацію CO_2 в атмосфері. Агрохімік Раттан Лал, один із найвідоміших ґрунтознавців сучасності, ще з 1990-х років пропагує ідею секвестрації вуглецю в ґрунтах як способу боротьби зі зміною клімату. Він показав, що відновлення деградованих ґрунтів і впровадження консерваційних методів землеробства (безвідвальне обробітку ґрунту, покривні культури тощо) здатне збільшити запаси органічного вуглецю і тим самим компенсувати 5–15% глобальних викидів парникових газів щороку (Lal, 2004). Лал наголошує, що підвищення вмісту ґрунтового вуглецю не лише зв'язує CO_2 , але й покращує родючість ґрунтів і світову продовольчу безпеку (Lal, 2004). Його роботи стали підґрунтям для численних досліджень у царині управління ґрунтовим вуглецем у різних екосистемах.

Об'єднавши знання про окремі ланки, учені перейшли до інтегрального дослідження глобального вуглецевого циклу. Мартін Хайманн і Маркус Райхштейн підкреслили, що наземні екосистеми можуть як поглинати, так і вивільняти величезні кількості вуглецю під впливом клімату, створюючи так звані зворотні зв'язки клімату й вуглецевого циклу (Heimann, Reichstein, 2008). Потепління, наприклад, здатне прискорити розклад органіки в ґрунті та підвищити викиди CO_2 , що ще більше посилює парниковий ефект. Визначити масштаб таких ефектів – складне завдання, тому вчені наголошують на необхідності глобального моніторингу і моделей системи «клімат–вуглець» (Heimann, Reichstein, 2008). Для координації зусиль у 2001 році було створено Глобальний карбоновий проєкт (Global Carbon Project), одним із керівників якого є д-р Ж. Канаделл. Щорічно ця команда (Корінн Ле Кере, П'єр Фрідлінгштейн, Філіпп Кіас та ін.) публікує глобальний вуглецевий бюджет, оцінюючи викиди CO_2 від людської діяльності та розподіл вуглецю між атмосферою, суходолом і океаном (Le Quéré et al., 2018). Ці дослідження вперше показали тривожну тенденцію: з початку XXI ст. темпи зростання CO_2 в атмосфері прискорилися, оскільки як економічне зростання, так і уповільнення покращення енергоефективності призвели до збільшення викидів, тоді як природні поглиначі почали відносно гірше справлятися із надлишковим вуглецем (Canadell et al., 2007). Інакше кажучи, ефективність океану та лісів у поглинанні CO_2 знизилася, що посилює накопичення парникових газів (Canadell et al., 2007). Внесок Ле Кере та її колег полягає у багаторічному відстеженні цих змін: їхні дані є основою для міжнародної кліматичної політики та перевіркою виконання цілей зі скорочення викидів (Le Quéré et al., 2018).

Отже, сучасні учені розглядають органічний вуглець не лише як об'єкт впливу, який людство може використовувати для пом'якшення зміни клімату, але і як суб'єкт, що сам реагує на клімат і здатен прискорювати або сповільнювати ці зміни.

1.2. Історія досліджень органічного Карбону в Україні.

У XXI столітті дослідження органічного карбону в Україні набули нового імпульсу у зв'язку з глобальною увагою до змін клімату та деградації ґрунтів. Офіційні дані підтверджують тенденцію до зниження запасів гумусу. У роботі Балюка

і співавт. (2016) наведено дані про втрату до 40–50% гумусу від початкового рівня за кілька десятків років інтенсивного землеробства. Така дегуміфікація веде до зменшення зв'язного азоту і сірки, погіршення структури ґрунту та його водного режиму (Балюк, 2016).

Україна приєдналася до міжнародної ініціативи “4 пер 1000” (4‰), метою якої є щорічне підвищення вмісту CO_n -органіки в ґрунті на 0,4% – це розглядається як один із інструментів пом'якшення глобального потепління і одночасно підвищення родючості (Позняк, 2021).

Для кращого оцінювання та моніторингу запасів органічного карбону залучають сучасні технології. У 2018 р. вперше створено цифрову національну карту запасів ґрунтового карбону України на основі великої бази даних аналізів ґрунтів. Плisko та ін. (2018) використали ~4000 зразків ґрунтів із архіву Інституту ґрунтознавства ім. Соколовського, доповнили їх геостатистичним моделюванням і отримали карту розподілу SOC з роздільною здатністю 1 км. Ця карта стала внеском України до Глобальної карти органічного карбону ґрунтів (GSOCmap), ініційованої ФАО. (Plisko, 2018)

Значна частина органічного карбону зосереджена не лише в ґрунтах сільгоспугідь, а й у лісових екосистемах – у біомасі дерев, лісовій підстилці та лісових ґрунтах. Ліси є найбільшим наземним сховищем карбону, тому оцінка їхнього органічного карбону (вуглецю, накопиченого в біомасі та ґрунтах) стала важливою науковою і прикладною задачею. Україна має близько 10 млн га лісів, які виконують роль карбонового поглинача (нетто-стіку). За оцінками, українські ліси в 2010 р. поглинули чисто ~11,4 млн тонн карбону (≈ 42 млн тонн CO_2), що на 25% менше, ніж раніше оцінювалося офіційно (Lesiv, 2019). Це пов'язано з уточненням даних про запас біомаси та вміст вуглецю. Вагомий внесок у дослідження лісового карбону зробив професор Петро Лакіда – його монографія «Фітомаса лісів України» (2002) стала основою для оцінки запасів вуглецю в деревостанах. Лакіда та колеги розробили моделі для розрахунку біомаси дерев за таксаційними показниками і оцінили, що українські ліси акумулюють у надземній та підземній біомасі приблизно 0,9 млрд тонн органічного карбону. Крім того, значні запаси C_{org} містяться в лісових ґрунтах

(в середньому 100–150 т/га в верхньому метрі, залежно від типу лісу). Особливо багаті на карбон бурі лісові ґрунти Карпат, які утворилися під пралісами – їхній вміст гумусу може сягати 5–10% у верхньому горизонті (Лакида, 2002).

Пізніше було започатковано інвентаризацію парникових газів у лісовому господарстві (Букша, Пастернак, 2005) та інші дослідження. У Карпатському регіоні, який вирізняється значним лісовим покривом, увага до вуглецевого балансу лісів підсилювалась також у контексті екологічної безпеки гірських територій (Фурдичко, 2002) і сталого розвитку Карпат. Так, у колективній монографії під ред. академіка М. Голубця було сформульовано концептуальні засади збалансованого розвитку гір, зацентровано увагу на збереженні природних лісових екосистем (Голубець, 2007). Ще раніше, у 1990-х роках, О. Марискевич та інші науковці досліджували процеси розкладання органічної речовини в карпатських лісах. Наприклад, у пралісах Українських Карпат було вивчено хімізм лісової підстилки: встановлено склад органічної речовини в підстилках різних типів деревостанів (Чорнобай, Марискевич, 1992). Ці піонерські роботи заклали історичне підґрунтя для сучасних досліджень карбону. Протягом останніх 10–15 років українські вчені суттєво розширили знання про запаси органічного карбону в лісових екосистемах, особливо в Карпатському регіоні. Важливою віхою стала робота І. Шпаківської та О. Марискевича (2009), які виконали першу детальну оцінку запасів органічного карбону в лісах Східних Бескид (Сколівські Бескиди) за даними лісовпорядкування. Вони показали, що тривале лісокористування призвело до помітного зниження запасів вуглецю в цих гірських лісах. Зменшення запасів автори пов'язали з інтенсивними рубками й порушенням структури лісу та запропонували реконструкцію лісових екосистем – відновлення корінного породного складу насаджень для підвищення їхньої вуглецепоглиняльної здатності (Максименко, 2022). Незважаючи на це, у дисертаційній роботі В. Пастернака (2011) було оцінено біопродуктивність лісів (для північного сходу України) в контексті кліматичних змін; ця оцінка охоплювала розрахунки вмісту карбону в живій фітомасі, підстилці та деревному детриті (Пастернак, 2011). Ці дослідження засвідчили необхідність врахування всіх пулів органічного вуглецю лісу (надземної біомаси, мортмаси та ґрунту) для повного вуглецевого балансу лісових

екосистем.

Наступні дослідження зосередилися на різних компонентах карбонового резервуару лісу та розробці методик їхнього оцінювання. Зокрема З. Гамкало та співавт. приділили увагу ґрунтовому пулу карбону, який є найбільшим і найстабільнішим. У монографії (Бедернічек, Гамкало, 2014) узагальнено теорію та методологію дослідження лабільної органічної речовини ґрунту – тієї частини ґрунтового карбону, яка швидко залучається до кругообігу. У подальших роботах цього колективу було висвітлено нові показники для оцінки карбонізації педосфери. Так, Гамкало, Шпаківська і Марискевич (2021) сформулювали поняття літогенного потенціалу карбонізації – впливу геолого-мінеральних чинників на накопичення органічного вуглецю в ґрунтах, а також ввели критерії ступеня насичення ґрунту вуглецем і дефіциту його насичення. У наступній праці цих авторів (Гамкало та ін., 2021) оцінено потенціал стабілізації сполук карбону в ґрунті й показано, що ґрунти під різними типами рослинності мають різний запас міцно зв'язаного вуглецю. Зокрема порівняння земель Карпатського регіону засвідчило, що лісові ґрунти вже наближені до свого вуглецевого насичення більше, ніж лучні: їхня здатність додатково акумулювати вуглець є нижчою. Такий результат узгоджується з даними закордонних досліджень, які доводять, що лісові ґрунти містять відносно стабільні запаси С і мають менший резерв для подальшої секвестрації, ніж ґрунти після розорювання або луки (Гамкало та ін., 2021).

Паралельно тривали дослідження старовікових лісів та пралісів Українських Карпат, які є своєрідними еталонами вуглецевого балансу. Важливий внесок здійснив В. Рожак. У 2014 р. він описав пулі та потоки карбону в лісових екосистемах Стрийсько-Сянської Верховини (Східні Бескиди), оцінивши розподіл вуглецю між живою біомасою, мортмасою і ґрунтом у гірських умовах. Пізніше Рожак спільно з І. Шпаківською та М. Папіш дослідили мертву деревину у старовікових буково-ялицевих лісах Карпатського національного парку (Чорногора). Вони проаналізували запаси та структуру грубих деревних залишків у лісових екосистемах віком близько 100–120 років (Рожак, Шпаківська, 2017). Дослідники виявили, що зі збільшенням висоти над рівнем моря змінюється співвідношення об'ємів мертвої деревини різних

стадій розкладу: у холодніших високогірних умовах зростає частка сильно розкладеної (трухлявої) деревини. Для пралісових ділянок було зафіксовано значну варіабельність запасів карбону мертвої деревини – від ~4 до 21 т С/га, залежно від умов місцезростання та історії розвитку насадження. Цей діапазон суттєво перевищує показники в господарських лісах, де мертва деревина зазвичай оперативно видаляється або її накопичення обмежене (Рожак, Шпаківська, 2017). У заповідних та малопорушених лісах Українських Карпат отримано численні кількісні дані про запаси органічного вуглецю. І. Пижик та І. Шпаківська провели низку польових досліджень у Східних Бескидах. Спочатку вони оцінили запаси карбону в грубих деревних залишках на природних ділянках РЛП «Надсянський» (Пижик, Шпаківська, 2018), а згодом виконали комплексне дослідження всіх основних пулів карбону (підстилка, мертва деревина, ґрунт) на території Верхньовисоцького лісництва (Турківський р-н, Львівщина). Це лісництво охоплює частину Стрийсько-Сянської Верховини і включає як стиглі ліси, так і зруби. За результатами їхніх вимірювань, сумарний запас органічного карбону в лісових екосистемах Верхньовисоцького лісництва (у шарі ґрунту 0–25 см із підстилкою та мертвою деревиною) становить близько 34–64 т С/га. Найбільша частка цього карбону зосереджена у ґрунті – приблизно 80–90% від загалу. На лісову підстилку припадає ще 8–16% С_{org}, а на грубі деревні рештки – лише близько 1–5%. Ці цифри підтверджують, що ґрунт є головним довготривалим резервуаром карбону навіть у гірських лісах. Водночас після суцільної рубки спостерігався суттєвий відтік вуглецю з екосистеми: на зрубках автори зафіксували втрату ~20–27 т/га органічного карбону порівняно з прилеглими лісовими ділянками (Пижик, Шпаківська, 2019). Це зумовлено вилученням деревини і мортмаси, а також прискоренням розкладу органіки у відкритих умовах після рубки.

Отримані наукові результати дозволяють зробити низку важливих висновків. По-перше, старовікові ліси і праліси Карпат виконують надзвичайно важливу функцію довготривалого зберігання органічного вуглецю. У них формуються великі запаси мертвої деревини та товстий шар підстилки, чого немає у більшості експлуатаційних лісів (Пижик, Шпаківська, 2019). Це вимагає особливих підходів до охорони таких лісів, адже вони слугують своєрідними «вуглецевими резерватами».

По-друге, результати польових вимірювань підтверджують висновки попередніх розрахункових робіт: інтенсивне лісокористування знижує вуглецевий потенціал екосистем. Науковці радять наближати склад і структуру господарських лісів до природних аналогів. Так, Шпаківська і Марискевич (2009) рекомендували відтворення корінних буково-хвойних насаджень замість спрощених монокультур, аби підвищити депонування карбону в лісах Східних Бескидів (Максименко, 2022). Така стратегія відповідає принципам сталого управління лісами, закріпленим у Карпатській конвенції, і сприятиме як збереженню біорізноманіття, так і пом'якшенню кліматичних змін (Фурдичко, 2002; Голубець та ін., 2007). По-третє, наукові напрацювання останніх років суттєво вдосконалили методологію обліку органічного карбону. З'явилися емпіричні моделі, які дають змогу за даними лісового таксаційного опису оцінити вміст вуглецю в нелегко вимірюваних пулах. Наприклад, у 2022 р. Х. Чернявська та І. Шпаківська побудували регресійні рівняння для оцінювання запасу карбону в лісовій підстилці залежно від типу деревостану, висоти над рівнем моря і крутизни схилу (Чернявська, Шпаківська, 2022). Такі моделі інтегрують дані ґрунтових досліджень із державним лісовим кадастром, що є кроком до створення повноцінного балансу карбону в лісах.

1.3. Стан вивченості та перспективи.

Наразі в Україні напрацьовано значний масив даних про запаси органічного карбону в лісових екосистемах, проте їхнє охоплення є нерівномірним. Найкраще вивченими є ліси Українських Карпат завдяки зусиллям науковців Інституту екології Карпат НАН України (м. Львів) та інших установ. Дослідження під керівництвом І. Шпаківської, О. Марискевича, за участі З. Гамкало, В. Рожака, І. Пижика та ін. забезпечили глибоке розуміння вуглецевих процесів у гірських лісах – від пралісів до порушених екосистем. За останнє десятиріччя опубліковано дані про запаси карбону майже для всіх компонентів карпатських лісів, включно з ґрунтами, що раніше лишались недостатньо врахованими. Водночас на рівні всієї країни ще залишаються прогалини: для багатьох регіонів (Полісся, Лісостеп) бракує таких детальних оцінок, як у Карпатах. Також потребує розвитку моніторинг динаміки запасів органічного Карбону. Зараз напрацьовані підходи дозволяють інтегрувати результати локальних

досліджень у національні інвентаризаційні системи. Показники, отримані для карпатських старовікових лісів, можуть бути використані як еталонні значення депонування вуглецю. Вчені наголошують на важливості продовження досліджень у межах довгострокового моніторингу, аби відстежувати вплив кліматичних змін і антропогенних чинників на вуглецевий баланс лісів (Volodymyrenko et al., 2016). Наприклад, дослідження мортмаси лісів України свідчать про необхідність врахування відмерлої органіки в ресурсно-екологічних оцінках лісів (Пижик, Шпаківська, 2019). Отримані українськими науковцями дані вже сьогодні використовуються для уточнення національних кадастрів парникових газів і розробки природоохоронних заходів. Подальша активна робота в цьому напрямі – запорука того, що ліси України, і зокрема унікальні ліси Карпат, надалі слугуватимуть надійним поглиначем атмосферного вуглецю та об'єктом наукових досліджень світового рівня.

1.4. Проблематика зміни клімату. Біотичний цикл органічного карбону в біосфері. Роль лісових екосистем у контролі рівня CO₂.

Зміна клімату – одна з найгостріших екологічних проблем сучасності, що впливає на всі аспекти життєдіяльності людини та функціонування екосистем. В останні десятиліття науковці фіксують безпрецедентне підвищення середньої глобальної температури, що безпосередньо пов'язане із зростанням концентрації парникових газів, таких як вуглекислий газ (CO₂), метан (CH₄) та оксиди азоту (NO_x) (FAO, 2020) (Nunes et al., 2020) (Швиденко та ін., 2014). Основними антропогенними джерелами цих газів є спалювання викопного палива, зміни в землекористуванні та індустріалізація. Проте геологи зазначають, що глобальні кліматичні зміни є частиною природного циклу зміни геологічних епох (Bernier et al., 2004) (Zachos et al., 2001). Згідно з останніми дослідженнями, антропогенний вплив значно прискорює ці природні процеси, сприяючи швидкому підвищенню температури (IPCC, 2021) (Steffen et al., 2018).

Вирубка лісів також є значним чинником, оскільки лісові екосистеми поглинають вуглекислий газ, але їхнє масштабне знищення зменшує здатність біосфери регулювати CO₂ (Nunes et al., 2020).

Зміна клімату має масштабні наслідки, що вже позначаються на природних системах та житті людей у всьому світі. Зростання середньої температури протягом останнього століття на 0,8-1,2°C спричиняє аномальні погодні явища (Швиденко та ін., 2014). Зміни режиму опадів ведуть до частішої появи сильної посухи, злив і повеней, які впливають на водні ресурси (FAO, 2020). Наприклад, у Сахелі, регіоні Африки, протягом останніх десятиліть спостерігається зменшення кількості опадів, що призводить до деградації земель і втрати продуктивності сільського господарства (UNEP, 2022). У Південній Азії збільшення інтенсивності мусонних дощів спричиняє частіші катастрофічні повені, що загрожують продовольчій безпеці (IPCC, 2021). Водночас у Південній Європі фіксується збільшення тривалості періодів посухи, що негативно впливає на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво (European Environment Agency, 2023). Унаслідок глобального потепління значні території в Африці, Азії та Південній Америці перетворюються на непридатні для життя зони (Nunes et al., 2020). Крім того, ліси, які виконують критично важливу функцію вуглецевого балансу, піддаються знищенню через вирубку та зміни клімату (Швиденко та ін., 2014).

Карпатські ліси зазнають негативного впливу через зменшення рівня ґрунтової вологи та збільшення ерозійних процесів (Рожак, 2015). Для зменшення негативного впливу змін клімату необхідно розширювати лісові масиви, адже відновлення та збереження лісів допоможе поглинати більше CO₂ та підтримувати екосистеми (Nunes et al., 2020). Окрім лісів, важливими природними механізмами поглинання вуглецю є океани, які щорічно поглинають близько 30% антропогенних викидів CO₂, а також торф'яники, що зберігають значні запаси органічного вуглецю (IPCC, 2021). Дослідження показують, що зміни в океанічній циркуляції можуть впливати на ефективність поглинання CO₂ морськими екосистемами (Gattuso et al., 2021). Важливим кроком є перехід на відновлювані джерела енергії. Це дозволить зменшити залежність від викопного палива та знизити глобальні викиди парникових газів (FAO, 2020). Раціональне використання природних ресурсів, разом із впровадженням екологічних стандартів у промисловості та сільському господарстві, допоможе мінімізувати вплив на клімат (Швиденко та ін., 2014). Зміна клімату – це глобальна

криза, що потребує невідкладних рішень. В Україні необхідно активізувати дослідження впливу змін клімату на природні екосистеми та розробити стратегії їхньої адаптації. Наразі реалізується низка наукових проєктів, таких як ініціативи Інституту екології Карпат щодо моніторингу динаміки вуглецевих потоків у лісових екосистемах та дослідження адаптаційних стратегій для агроландшафтів у межах програм ЄС Horizon 2020 (Інститут екології Карпат, 2022). Крім того, в Україні діє національна програма збереження торфовищ як ключового резервуара органічного вуглецю, що координується Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів (Міндовкілля, 2023).

Біотичний цикл органічного карбону є складною взаємопов'язаною системою перетворень, що охоплює фіксацію, накопичення та повернення вуглецю в різних природних середовищах.

Органічний карбон є основним елементом життєвих процесів у біосфері, який відіграє ключову роль у біогеохімічних циклах. Дослідження свідчать, що рослинність, ґрунти та водні системи є основними депо органічного вуглецю (Алушкіна, 2022; Blavascunas, 2020). Фотосинтез є первинним механізмом фіксації вуглецю в біосфері. Автотрофні організми, такі як рослини, водорості та ціанобактерії, засвоюють CO_2 з атмосфери та перетворюють його на органічні сполуки. Це сприяє накопиченню біомаси та подальшій передачі органічного вуглецю через трофічні рівні (Jurasinski et al., 2012). Дослідження підтверджують, що лісові екосистеми можуть накопичувати значні обсяги вуглецю, зменшуючи його концентрацію в атмосфері (Tokar et al., 2021).

Дослідження на території РЛП "Надсянський" свідчать про високу секвестраційну здатність лісів завдяки значному накопиченню органічного вуглецю в мертвій деревині, лісовій підстилці та гумусових горизонтах ґрунту (Пижик, Шпаківська, 2020). У природних лісах Українських Карпат цей процес є особливо вираженим, оскільки стабільний мікроклімат сприяє довготривалому утриманню карбону (Смалійчук та ін., 2019). Дослідження показують, що запаси вуглецю в таких екосистемах можуть досягати 300 тонн на гектар (Приріст старовікових деревостанів, 2020). Збереження цих екосистем є важливим заходом для стримування змін клімату

(Гамор, 2013). Розглядаючи цикл органічного карбону у екосистемі, яка є багатокомпонентною структурною одиницею біосфери, виділяємо чотири пули наземних екосистем. Це фітомаса, її продукція – підстилка та , а також ґрунт.

Фітомаса є ключовим компонентом біотичного циклу органічного карбону, оскільки вона виступає основним накопичувачем і трансформатором органічної речовини в природних екосистемах. У процесі фотосинтезу рослини засвоюють атмосферний CO₂, синтезуючи органічні сполуки, які накопичуються у вигляді фітомаси (Козак та ін., 2014).

У лісових екосистемах фітомаса виступає основним депо органічного карбону. Деревні насадження можуть накопичувати значні обсяги біомаси, які залежать від виду дерев, віку насаджень і типу лісорослинних умов (Задорожний, 2021). Наприклад, у Полонинському хребті Українських Карпат середня щільність фітомаси букових і ялинових деревостанів варіюється залежно від типу лісу, кліматичних умов і продуктивності насаджень.

Фітомаса відіграє важливу роль у біологічному кругообігу карбону, забезпечуючи його циркуляцію між атмосферою, рослинами та ґрунтом. Внаслідок розкладу рослинної органіки відбувається повернення карбону у вигляді CO₂ в атмосферу або його акумуляція у ґрунтовому покриві, що значно впливає на загальний баланс карбону в екосистемах (DeVries et al., 2012).

В умовах кліматичних змін, які супроводжуються зміною температурного режиму та рівня вологості, процеси накопичення та розпаду фітомаси можуть змінюватися. Зменшення біомаси або деградація лісових екосистем сприяє збільшенню концентрації CO₂ в атмосфері, що, у свою чергу, є одним із факторів зміни клімату. (Козак та ін., 2014).

. Наукові дослідження показують, що запаси органічного карбону в ґрунтах лісових екосистем Стрийсько-Сянської Верховини можуть досягати 56,97 т·га⁻¹, залежно від типу ґрунту та його використання (Пижик, Шпаківська, 2019). Близько 1500 гігатонн вуглецю міститься у ґрунтах по всьому світу, що перевищує його кількість в атмосфері та біосфері разом узятих (Moinet et al., 2023).

Грубі деревні залишки (coarse woody debris,) є невід'ємним компонентом

карбонового циклу лісових екосистем. Вони виконують подвійну функцію: слугують сховищем органічного вуглецю та джерелом живлення для редуцентів, які поступово розкладають органічну речовину. В Карпатських лісах може складати від 10% до 35% загального запасу органічного карбону у надземній біомасі, а їхній внесок у довготривале утримання вуглецю в ґрунтах оцінюється на рівні 15-25% (Рожак, Шпаківська, Папіш, 2017). Запаси карбону в зазвичай коливаються від 0,16 до 2,86 т/га, що є суттєво меншим, ніж у ґрунті, проте критично важливим для підтримання вуглецевого циклу (Пижик, Шпаківська, 2019).

Лісова підстилка є ключовим компонентом лісових екосистем, що відіграє важливу роль у біотичному циклі органічного карбону. Вона складається з опалого листя, хвої, гілок, кори та інших органічних залишків, які поступово розкладаються під впливом мікроорганізмів, перетворюючись на гумус та сприяючи поповненню вуглецевого резервуару ґрунту (Чернявська, Шпаківська, 2022).

Порівняно з ґрунтами лісова підстилка містить значно меншу загальну кількість карбону, проте її роль як швидкого проміжного резервуару є надзвичайно важливою. Підстилка забезпечує живлення ґрунтових мікроорганізмів і поступову мінералізацію органічної речовини, що сприяє збереженню продуктивності лісових екосистем (Пижик, Шпаківська, 2019). У той час, як основний запас органічного карбону знаходиться в ґрунтах (до 56,97 т/га), лісова підстилка акумулює від 3,94 до 9,07 т/га карбону залежно від типу лісу (Пижик, Шпаківська, 2019).

Таким чином, фітомаса, лісова підстилка, ґрунти та грубі деревні залишки взаємопов'язані у процесах акумуляції та перерозподілу органічного карбону. Фітомаса виступає найбільшим пулом генерації та депонації органічного Карбону в екосистемі. Підстилка відіграє роль швидкого резервуару органічного матеріалу, що живить ґрунтові мікроорганізми та сприяє утворенню стабільних органічних сполук у ґрунті, тоді як є довготривалим резервуаром, що уповільнює обмінні процеси та забезпечує сталий потік органічного карбону в екосистемі (Lee et al., 2020).

Гірські екосистеми, зокрема Карпати, мають особливе значення в регуляції вуглецевого балансу, оскільки їхні ґрунти здатні утримувати значну кількість органічного вуглецю. У той же час болотні екосистеми можуть депонувати ще більше

вуглецю через анаеробні умови, що уповільнюють його мінералізацію (Joshi, Singh, 2020; Sierra et al., 2024). Висока вологість і низькі температури в цих регіонах сприяють уповільненню розкладу органічної речовини та накопиченню вуглецю у ґрунтах (Joshi, Singh, 2020). Дослідження підтверджують, що гірські ґрунти можуть утримувати до 200 тонн вуглецю на гектар, що є важливим показником для глобального вуглецевого циклу (Sierra et al., 2024).

Антропогенні фактори суттєво впливають на баланс органічного вуглецю. Одним із ключових факторів є деградація лісів внаслідок вирубки, пожеж і змін у землекористуванні. Дослідження вказують, що втрата природних лісів може призвести до викиду понад 1,5 гігатонни CO₂ щороку, що значно посилює парниковий ефект (Смалійчук та ін., 2019). Вирубка лісів сприяє викиду CO₂ в планетарних масштабах, тоді агресивне землекористування може зменшити вуглецеві резервуари ґрунтів на 25% (Ahmed et al., 2018). Наприклад, дослідження в Амазонії показали, що вирубка лісів скорочує поглинання вуглецю на 50% у порівнянні з незайманими екосистемами (Santos et al., 2019). Вирубка лісів, зміни в землекористуванні та глобальне потепління спричиняють збільшення концентрації CO₂ в атмосфері, що пришвидшує парниковий ефект (Ahmed et al., 2018). Дослідження свідчать, що сталий підхід до землекористування може сприяти збільшенню депонування вуглецю та зменшенню його викидів (Santos et al., 2019).

Роль лісових екосистем у контролі рівня CO₂ є надзвичайно важливою для підтримки глобального кліматичного балансу. Лісові масиви відіграють ключову роль у процесах депонування, секвестрації та емісії органічного карбону, впливаючи на концентрацію парникових газів у атмосфері. У різних широтах ці процеси мають свої особливості, обумовлені кліматичними умовами, видовим складом і рівнем антропогенного впливу.

Вирубка лісів є однією з головних екологічних проблем сучасності. Вона спричиняє втрату ґрунтового покриву, що, у свою чергу, веде до його деградації та зменшення родючості (Крамарець та ін., 2024). Дослідження показують, що втрата фітомаси через вирубку лісів спричиняє зменшення запасів органічного карбону на 50 – 60% порівняно з природними лісами. Вміст карбону в грубих деревних залишках

також зазнає суттєвого скорочення – на 40-50%, що впливає на тривалість розкладу органічної речовини і баланс CO_2 в атмосфері (Aloshkina et al., 2011). Після інтенсивного вирубування підстилки її запас карбону зменшується на 30-40%, це явище спостерігається в бореальних і помірних лісах Північної Америки та Європи (Harmon, Hua, 2005).

Лісові екосистеми виконують важливу функцію утримання ґрунту, запобігаючи його ерозії та знесенню родючого шару вітрами й дощами (Blavascunas, 2020). Втрата лісів також призводить до зменшення водоносних горизонтів, оскільки дерева відіграють важливу роль у регуляції водного балансу, допомагаючи зберігати вологу в ґрунті (Aloshkina et al., 2011).

Лісові ґрунти є критичними сховищами органічного вуглецю, оскільки вони містять від 30% до 70% усіх запасів карбону в екосистемі (Крамарець та ін., 2024). Вологі лісові ґрунти, зокрема торфовища, можуть зберігати вуглець протягом тисячоліть, запобігаючи його потраплянню в атмосферу у вигляді CO_2 та метану (Nunes et al., 2020).

1.5. Дослідження органічного Карбону в гірських екосистемах. Українські Карпати.

Дослідження органічного карбону в гірських екосистемах є важливим напрямком сучасної екології. Це пояснюється їхніми унікальними кліматичними умовами, складною рельєфною структурою та високою біорізноманітністю. Такі особливості впливають на процеси акумуляції та міграції карбону, особливо в контексті глобальних змін клімату та регіональних екосистемних трансформацій. Лісові екосистеми, зокрема такі як старовікові ліси Українських Карпат, відіграють ключову роль у циклі органічного карбону, забезпечуючи його акумуляцію та довготривале секвестрування (Пижик, Шпаківська, 2020). Оцінка запасів і динаміки органічного карбону є необхідною для розуміння потенціалу лісів у пом'якшенні кліматичних змін.

Лісові екосистеми Карпатської гірської системи є значним резервуаром органічного карбону, загальні запаси якого оцінюються у 244 т/га у НПП «Сколівські Бескиди» та 205 т/га у природному заповіднику «Горгани» (Токар та ін., 2021).

Високопродуктивні деревостани цих екосистем характеризуються інтенсивним фотосинтезом і біомасонагромадженням, що сприяє значному внеску в регіональний і глобальний вуглецевий баланс (Смалійчук та ін., 2019). У старовікових лісах рівень депонування карбону може досягати 4-6 т/га/рік (Черневий, Третьак, 2010). Основними компонентами карбонових запасів є жива надземна біомаса, мертва деревина, лісова підстилка та ґрунтова органічна речовина. Ґрунтовий пул органічного карбону в старовікових лісах Українських Карпат є особливо важливим, оскільки вміст гумусу тут значно перевищує аналогічні показники в експлуатованих лісах (Чорнобай, 2020).

Праліси – це унікальні екосистеми, що зберігають природну динаміку лісових процесів. Вони відіграють ключову роль у біогеохімічних циклах, підтримуючи стабільний карбоновий баланс завдяки повільному розкладу мертвої деревини та значному накопиченню органічного карбону в ґрунтах. Праліси забезпечують стабільні умови для мікроорганізмів і грибів, які беруть участь у розкладі органічної речовини. Це дозволяє ефективно регулювати потоки карбону між атмосферою, рослинністю та ґрунтом. Для оцінки вуглецевого балансу використовуються такі методи, як дистанційне зондування, аналіз потоків вуглецю за допомогою флюксометричних станцій, а також довготривалі моніторингові дослідження змін запасів карбону в ґрунті та рослинності. В Українських Карпатах збереглися значні масиви пралісів, зокрема Угольсько-Широколужанський масив, Горгани, Мармароський масив і пралісові ділянки в заповіднику «Горгани» (Гамор та ін., 2013). Ці ліси характеризуються багатоярусною структурою, значною часткою мертвої деревини та високою стабільністю біотичних циклів. Вони накопичують значні запаси органічного карбону в ґрунті та надземній біомасі, відіграючи важливу роль у секвестрації CO₂ (Криницький та ін., 2014). Отримані дані дозволяють оцінити вплив пралісів на баланс органічного карбону та їхню роль у глобальному вуглецевому циклі. Вони виконують надзвичайно важливу функцію в підтримці біорізноманіття, регуляції гідрологічних процесів і секвестрації органічного Карбону (Гамор та ін., 2013).

Ці ліси зберегли природну структуру, мають багатоярусний деревостан, а їхня

уповільнена мінералізація органічної речовини зумовлена низькими температурами, високою вологістю та значною кількістю опадів, які знижують активність розкладу мертвої деревини та підстилки. Важливу роль у цьому процесі відіграють також ґрунтові мікроорганізми, які розщеплюють органічну речовину, сприяючи її перетворенню у стабільні форми гумусу (Рожак та ін., 2013). Значний відсоток мертвої деревини та розвинений шар підстилки сприяє накопиченню органічного карбону в ґрунтах і надземній біомасі. У пралісах Українських Карпат запаси органічного карбону можуть сягати 350-400 т/га, тоді як у більш молодих лісах цей показник значно нижчий – 150-200 т/га (Гамор та ін., 2013). У ґрунтах пралісів вміст органічної речовини досягає 15-20%, що перевищує аналогічні показники в експлуатованих лісах, де цей рівень становить 5-10% (Konôrka et al., 2019). Крім того, депонування карбону в мертвій деревині в пралісах може досягати 30-50 т/га, у той час як у молодших лісах цей рівень обмежений 10-20 т/га (Рожак та ін., 2013). Офіційне визнання цих територій пралісами забезпечить їхню належну охорону, сприятиме міжнародному визнанню та інтеграції у світові програми зі збереження природних екосистем. Це також допоможе підтримати баланс органічного карбону та запобігти викидам CO₂ унаслідок господарської діяльності.

У таких лісах відсутній антропогенний вплив, що сприяє стабільному функціонуванню карбонових потоків і довготривалому збереженню органічної речовини в ґрунтах і надземній біомасі (Криницький та ін., 2014). Відмінністю гірських екосистем є те, що тут процеси депонування, секвестрації та емісії органічного карбону проходять у специфічних умовах низьких температур, високої вологості та значної кількості опадів, що уповільнює процеси розкладу органічної речовини, а також сприяє накопиченню карбону (Рожак та ін., 2017).

Окрім уже визнаних пралісових масивів, в Українських Карпатах існує низка старовікових лісів, які мають усі характеристики пралісів і потребують офіційного затвердження цього статусу. Наукові дослідження свідчать, що ці ліси мають високу частку мертвої деревини, значний запас органічного карбону в ґрунтах та стабільну біогеохімічну динаміку, що характерно для природних лісових екосистем (Смалійчук та ін., 2019). Зокрема в дослідженнях, проведених у Свидовецькому масиві, було

виявлено, що середній вміст органічного карбону в ґрунті становить 18-22%, що перевищує аналогічні показники в експлуатованих лісах (Konôrka et al., 2019). Ці показники підтверджують необхідність офіційного визнання цих територій пралісами для їхньої ефективної охорони. До таких територій належать частини Свидовецького, Чорногірського та Бескидського масивів, ліси в районі Верховинського національного природного парку, а також деякі ділянки в межах Національного природного парку «Синевир» та «Західні Горгани» (Гамор та ін., 2013).

Прикладом для України мають бути впроваджені міжнародні ініціативи, що сприяють впровадженню заходів із збереження та охорони пралісів як національної спадщини. Це спадок, який є актуальним для всього людства. Із найбільших міжнародних ініціатив доцільно згадати про:

- Європейську програму ЮНЕСКО

Програма «Primeval Beech Forests of the Carpathians and Other Regions of Europe» включає понад 90 ділянок у 18 країнах, зокрема в Німеччині, Словаччині, Румунії та Україні. Ця ініціатива спрямована на збереження унікальних букових пралісів, що мають важливе значення для глобальної екологічної рівноваги. У межах цієї програми країни-учасниці запровадили суворі природоохоронні заходи, включаючи заборону вирубки та мінімізацію людського впливу (Гамор та ін., 2013).

- Національні парки США

У Сполучених Штатах праліси охороняються в межах великих національних парків, таких як Great Smoky Mountains National Park та Olympic National Park. У цих парках діють програми суворої охорони природних екосистем, що включають заборону на комерційну вирубку лісу, відновлення деградованих територій шляхом природної сукцесії, а також постійний екологічний моніторинг. Застосовуються технології дистанційного зондування для оцінки змін у лісових екосистемах та контролю за нелегальними втручаннями. Велика увага приділяється екологічній освіті та залученню місцевих громад до програм збереження біорізноманіття. Тут впроваджені довготривалі програми моніторингу лісових екосистем, що дозволяють відстежувати зміни запасів органічного карбону, вивчати вплив зміни клімату на лісові екосистеми, а також підтримувати природне відновлення деревостанів (Egan et

al., 2017).

- Канади – Boreal Forest Conservation Framework

У Канаді діє Boreal Forest Conservation Framework, який передбачає збереження не менше 50% бореальних лісів у природному стані. Ця ініціатива підтримується урядом Канади та міжнародними екологічними організаціями, зокрема WWF. Завдяки цій програмі було створено великі природоохоронні території, які відіграють важливу роль у збереженні біорізноманіття та акумуляції вуглецю в лісових екосистемах (Konôrka et al., 2019).

- Програми ЄС із біорізноманіття до 2030 року

У рамках Європейської зеленої угоди (European Green Deal) впроваджується Стратегія ЄС із біорізноманіття до 2030 року, яка передбачає заходи для захисту старовікових лісів і пралісів. Основні цілі – розширення заповідних територій, створення екологічних коридорів між природними лісами та посилення моніторингу за станом лісів. Це сприяє глобальному зниженню викидів CO₂ та покращенню кліматичної стабільності регіону (Гамор та ін., 2013).

Ці ініціативи демонструють важливість комплексного підходу до охорони пралісів, який включає законодавчі обмеження, міжнародну співпрацю та довготривалі наукові дослідження. Україна також може застосувати цей досвід для ефективного збереження власних пралісових екосистем.

Для цього впроваджуються природоохоронні заходи, зокрема створення заповідних зон, моніторинг лісових екосистем, обмеження вирубки та відновлення деградованих територій шляхом природного поновлення деревостанів для підтримання вуглецевого балансу регіону. У межах природоохоронних територій, таких як РЛП «Надсянський», було виявлено, що природні ліси акумулюють більше органічного карбону, ніж ліси, що зазнають антропогенного впливу (Пижик, Шпаківська, 2020). Це пов'язано з меншим рівнем порушень і довготривалістю природних сукцесійних процесів, які сприяють формуванню стабільних угруповань деревостанів.

Крім того, дослідження процесів мінералізації органічного карбону свідчать про різні темпи розкладу залежно від екологічних умов. У вологих ґрунтах

Карпатських лісів процеси мінералізації уповільнені. Це сприяє накопиченню органічної речовини. Водночас у деградованих або порушених екосистемах відбувається швидша мінералізація, що веде до зменшення карбонових запасів (Egan et al., 2017).

Дослідження, проведені в Українських Карпатах, свідчать, що особливості кругообігу органічного карбону в цих екосистемах відрізняються від рівнинних лісів. Високий рівень опадів і низькі температури знижують швидкість мінералізації органічної речовини, що веде до накопичення значних запасів органічного карбону в лісовій підстилці та ґрунті (Рожак та ін., 2013). Однак, інтенсивні зміни клімату можуть впливати на ці процеси, прискорюючи деградацію органічної речовини та збільшуючи викиди CO₂ (Konôrka et al., 2019). Науковці також наголошують на необхідності переходу до екологічно збалансованого ведення лісового господарства, яке дозволить мінімізувати втрати карбону та сприяти збереженню природних екосистем (Криницький та ін., 2003). Використання наближених до природи методів лісокористування може забезпечити стійке функціонування карпатських лісів як важливого резервуару органічного карбону та запобігти його втратам унаслідок інтенсивного господарського освоєння території (Токар та ін., 2021).

Значну увагу приділяють питанням адаптації лісів до змін клімату та розробці методів екологічного лісокористування (Сколе-Львів, 2024). Використання природозберігальних методів ведення лісового господарства дозволить підвищити секвестраційний потенціал лісів і мінімізувати втрати органічного карбону.

Дослідження органічного карбону в гірських екосистемах Українських Карпат є актуальним напрямом. Подальші дослідження варто зосередити на довготривалому моніторингу змін карбонового балансу в умовах зміни клімату, оцінці впливу антропогенних факторів на процеси секвестрації вуглецю, а також розробці стратегій адаптації лісових екосистем. Необхідно посилити міжнародну співпрацю в рамках природоохоронних програм та створити нові заповідні території, які забезпечать захист старовікових лісів і підтримку їхньої ролі в глобальному вуглецевому балансі. Лісові екосистеми відіграють ключову роль у процесах секвестрації карбону, а їхнє збереження сприятиме стабілізації регіонального та глобального вуглецевого

балансу. Необхідні подальші наукові розвідки для глибшого розуміння цих процесів і розробки ефективних стратегій управління природними ресурсами.

Висновки до розділу 1.

Лісові екосистеми є важливим компонентом глобального циклу Карбону, забезпечуючи його акумуляцію у фітомасі, мертвій деревині, лісовій підстилці та ґрунті. Співвідношення між цими пулами визначається природно-кліматичними умовами, структурою деревостанів, характером ґрунтового покриву та інтенсивністю антропогенного впливу. Особливе значення у довготривалому зберіганні органічного Карбону мають ґрунти та мортмаса, тоді як фітомаса забезпечує його первинне зв'язування у процесі фотосинтезу.

Старовікові та природні ліси характеризуються сформованою структурою деревостанів, значними запасами мертвої деревини та відносно стабільним функціонуванням основних компонентів біотичного циклу Карбону. На відміну від експлуатованих лісів, у таких екосистемах забезпечується тривале утримання органічної речовини у різних пулах та її поступове залучення до процесів трансформації й мінералізації. Тому старовікові ліси можуть розглядатися як важливі природні еталони для оцінювання закономірностей акумуляції, перерозподілу та збереження органічного Карбону.

Для гірських лісових екосистем Українських Карпат особливого значення набуває вплив висотної диференціації кліматичних та едафічних умов. Температурний режим, кількість опадів, зволоження ґрунту, експозиція і крутизна схилів визначають інтенсивність продукційних та деструкційних процесів, а отже — співвідношення між надходженням органічної речовини та її мінералізацією. Водночас антропогенне порушення лісових екосистем може змінювати структуру карбонових пулів і спричиняти зменшення запасів органічного Карбону.

Аналіз досліджень, проведених в Українських Карпатах, засвідчує значний обсяг накопичених даних щодо карбону фітомаси, мертвої деревини, лісової підстилки та ґрунтів. Разом із тим просторове охоплення цих досліджень залишається нерівномірним, а для окремих гірських територій комплексні оцінки всіх основних пулів органічного Карбону є недостатніми. Особливо актуальним є дослідження

старовікових лісів як екосистем із мінімальним антропогенним впливом, у яких можна оцінити природні закономірності формування та перерозподілу карбонових запасів.

Отже, комплексне визначення запасів органічного Карбону у фітомасі, мортмасі, лісовій підстилці та ґрунті, а також аналіз їхньої залежності від природних умов є необхідною передумовою для оцінювання карбонової функції старовікових лісів. Це визначає доцільність дослідження старовікових лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта як недостатньо вивченої території Українських Карпат та обґрунтовує необхідність комплексної оцінки закономірностей акумуляції органічного Карбону в їхніх основних компонентах.

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ФОРМУВАННЯ СТАРОВІКОВИХ ЕКОСИСТЕМ ВОДОДІЛЬНО-ВЕРХОВИНСЬКОГО ХРЕБТА

2.1. Фізико-географічна характеристика території досліджень

Верховинський Вододільний хребет (Вододільно-Верховинський) розташований у межах Українських Карпат, на кордоні Закарпатської та Львівської областей (Кравчук, 2021¹). Досліджуваний сегмент охоплює простір від г. Журівка до г. Пікуй. Гора Журівка (1177 м) є однією з північно-західних вершин цього хребта, вона формує важливий орографічний рубіж. Гора Пікуй (1408 м) – найвища точка всього масиву та яскраво виражена домінантна вершина серед довколишнього рельєфу (Кравчук, 2017). Таке простягання зумовлює належність хребта до головного європейського вододілу, який розмежовує басейни Балтійського й Чорного морів, роблячи цей орографічний елемент одним із ключових у структурі Карпат (Районування Карпат, 2010). За даними монографії «Рельєф Українських Карпат» (Кравчук, 2021), довжина хребта в цьому секторі становить близько 70 км, від Ужоцького перевалу (~ 889 м) до Вишківського (Торунського) перевалу (~ 941 м). Вершини Журівки та Пікуя формують природні орієнтири меж центральної ділянки хребта.

Географічні та структурні межі хребта чітко відділяють його від сусідніх фізико-географічних одиниць. На північному схилі локалізується зона Скибових Карпат, зокрема Стрийсько-Сянський масив, верхів'я рік Стрий і Сян (Кравчук, 2005²). На південному боці прилягають внутрішні зони: Воловецька верховина, Полонинські Карпати, Горгани (Кравчук, 2008³). У перехідних ділянках зчленування спостерігаються тектонічні лінії, насуви й складки, що вказують на контактні зони між Скибовою і Внутрішньою зонами (Кравчук, 2005; Кравчук, 2021).

З північного сходу Вододільно-Верховинські Карпати межують зі Скибовими Карпатами, які відділяються системою поздовжніх долин річок Стрий, Опір і верхів'їв Сяну. Ці долини формують чіткий природний бар'єр, що розділяє дві морфоструктурні зони (Кравчук, 2017). З південного заходу вони межують із Полонинсько-Чорногірськими Карпатами, від яких відокремлюються як

морфологічно, так і геологічно. Внутрішніми зонами виступають: Воловецька верховина, Полонинські Карпати, Горгани (Кравчук, 2008³). Полонинські масиви мають характерні згладжені форми й значно вищі абсолютні відмітки, ніж власне Вододільно-Верховинський хребет (Районування Карпат, 2010). На заході межа простягається до Верхньодністровських Бескидів, які мають нижчі висоти та іншу морфологію, утворюючи поступовий перехід до передгірних ландшафтів. На сході сусідами є Горгани – гірський масив із характерними кам'яними розсипами та більш різко вираженою морфологією, що відрізняє їх від більш згладжених форм Вододільно-Верховинського хребта (Природа Львівської області, 1972). У перехідних ділянках зчленування спостерігаються тектонічні лінії, насуви й складки, що вказують на контактні зони між Скибовою і Внутрішньою зонами (Кравчук, 2005; Кравчук, 2021).

Вододільно-Верховинський хребет належить до середньогірних територій Українських Карпат і характеризується значною висотною диференціацією рельєфу. У межах досліджуваного сегмента абсолютні висоти переважно становлять 800–1200 м н.р.м., а найвищою вершиною є г. Пікуй. Рельєф хребта представлений системою видовжених гребенів, куполоподібних вершин, сідловин і схилів різної крутизни, що зумовлює виражену експозиційну та висотну диференціацію природних умов (Кравчук, 2005; Кравчук, 2021). Поперечна ширина масиву в межах хребта здебільшого 20–30 км, іноді звужуючись поблизу перевалів (Кравчук, 2005). Гребенева лінія має звивистий характер із чергуванням сідловин і куполоподібних вершин (Кравчук, 2021).

Асиметрія схилів — важлива риса: південні схили часто круті, з великими перепадами, а північні — м'якші й довші (Кравчук, 2005). Відносні перепади між гребенем і підніжжям на південному боці можуть досягати 600–800 м, на північному — 300–500 м (Кравчук, 2005). Через крутизну схилів південного боку спостерігається інтенсивніша ерозія й активність схилових процесів. Пологі північні схили переходять у передгір'я Стрийсько-Сянської зони (Кравчук, 2008).

Гребеневий вододіл хребта збігається з головним європейським вододілом, який розділяє басейни Чорного й Балтійського морів. На північному схилі

зароджуються річки Стрий і Сян, на південному — Уж, Латориця, Ріка (Кравчук, 2005). Таким чином, хребет виконує роль гідрологічної межі між водозборами.

У гребеневій і перехідних зонах розташовані полонини — сідловині чи випростані ділянки, які виникли внаслідок трансформацій рельєфу разом із людською діяльністю (Сливка, 2001⁴). Частина з них розміщена безпосередньо в зоні гребеня чи на схилах, формуючи ланцюжкові сідловини з меншим рельєфним контрастом (Сливка, 2001).

Південний макросхил характеризується стрімким рельєфом із значним перепадом і концентрованим стоком. Через крутизну і компактність водотоків, відбуваються активні схилі процеси: зсуви, осипи, глибока денудація. Північний макросхил має плавні обриси, довші й менш круті схили, з більш рівномірним перепадом і дренажною мережею (Сливка, 2001; Кравчук, 2005). На південному схилі долини часто мають V-форму, із притоками з високим градієнтом. На північному боці долини ширші, профілі м'якші, вертикалізація знижена (Сливка, 2001). Північний макросхил через свою пологість інтенсивно освоювався людьми (вирубка лісів, полонини, тераси). Ці трансформації створювали нестабільні трансмісії, активували ерозію. Південний макросхил, який є менш освоєним, усе ж піддається локальним втручанням (Кравчук, 2008).

Отже, північний макросхил репрезентує більш м'яку, розпростерту структуру з меншими перепадами та помітним антропогенним слідом; південний — крутіший, з концентрованим стоком і активнішою морфодинамікою.

Район хребта розташований між Скибовою (зовнішньою) та Внутрішньою зонами Карпат. Північна частина належить до Скибової системи з покривними насувними структурами флішу (Кравчук, 2005). Внутрішня зона (Кросненська / Верховинська) проходить по гребеню й характеризується меншою дислокацією (Кравчук, 2005; Кравчук, 2021). У межах хребта трапляються перехідні структури — складки, локальні насуви, розломи (Кравчук, 2005). Породи хребта належать до флішового комплексу — чергування пісковиків, алевролітів, аргілітів, конгломератів. У Кросненській зоні переважають міцні олігоцені пісковики (Кравчук, 2005). Синклінальні простори заповнені слабшими прошарками аргілітів та сланців. У зоні

Скибової зони (північний схил) можуть траплятися червоні піски, алювіальні відклади — компоненти зовнішньої флішової системи (Кравчук, 2005).

Неотектонічні рухи проявлялися підняттям плато висот ~800–900 м у неогені та четвертині (Кравчук, 2005; Кравчук, 2021). Морфоструктури — тераси, ступінчасті схили — зберігають сліди цих рухів. Сьогодні в районі діють процеси ерозії, схилової денудації, зсувів і осипів, зокрема на крутих південних схилах. У вузьких ущелинах іноді спостерігаються селеві потоки, на вершинах полонин — локальні лавини. Антропогенний вплив (тераси, вирубки, дороги) особливо активний на північному макросхилі, що посилює процеси ерозії (Кравчук, 2008). У критичних місцях — контакти між жорсткими пісковиками й м'якими аргілітами — часто формуються тріщини, осипи, локальні зрушення під впливом гідрологічної або антропогенної активності.

2.2. Клімат

Район дослідження характеризується середньогірним рельєфом зі значною висотною диференціацією та прилеглими міжгірними долинами й зниженнями. Така орографічна будова зумовлює виражену вертикальну диференціацію кліматичних умов і помітні відмінності між північним та південним макросхилами Вододільно-Верховинського хребта. Клімат району помірно континентальний, вологий, із надлишковим зволоженням, відносно м'якою зимою та неспекотним літом (Природа Закарпатської області, 1981; Шаблій та ін., 1998). Основними чинниками його формування є радіаційний баланс, загальна циркуляція атмосфери та гірський рельєф, який визначає орографічний перерозподіл повітряних мас, температури й атмосферних опадів.

Для району характерний низькогірний рельєф: середні абсолютні висоти становлять близько 600–700 м н.р.м. із окремими вершинами понад 1000–1200 м. Така орографія зумовлює значну вертикальну кліматичну зональність і помітні відмінності між кліматом північного (прикарпатського) та південного (закарпатського) макросхилів хребта. Клімат району помірно континентальний, вологий, із надлишковим зволоженням та м'якою зимою і неспекотним літом (Природа Закарпатської області, 1981; Шаблій та ін., 1998). Основними чинниками формування

кліматичних умов є радіаційний баланс, загальна циркуляція атмосфери та гірський рельєф, який створює орографічний ефект – бар’єр для повітряних мас і локальні мікрокліматичні особливості. Нижче розглянуто температурний режим, опади, сніговий покрив і вітрові особливості обох макросхилів Вододільно-Верховинського хребта, з опорою на дані чотирьох метеостанцій: Славське, Турка (північний схил, Львівщина) та Плай, Латірка (південний схил, Закарпаття).

Термічні умови району дослідження характеризуються поступовим зниженням температури з висотою (вертикальний градієнт близько $0,6^{\circ}\text{C}$ на 100 м влітку і $0,4^{\circ}\text{C}$ на 100 м взимку) і загалом дещо теплішим кліматом на південному макросхилі. Багаторічні дані свідчать, що середня річна температура повітря на висотах ~ 600 м становить $+5\dots+6^{\circ}\text{C}$ (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Так, у Славську (589 м, північний схил) середня за рік – $+5,2^{\circ}\text{C}$, а в Турці (592 м, долина північного схилу) – $+5,7^{\circ}\text{C}$ (Шаблій та ін., 1998). На південному макросхилі аналогічні значення: для станції Латірка (с. Латірка, 622 м н.р.м.) можна оцінити середню у $+5,5^{\circ}\text{C}$, тобто різниця між схилами незначна. Узимку на північних схилах дещо холодніше: середня температура січня у Славську опускається до $-6,5^{\circ}\text{C}$, тоді як на південному схилі (Латірка) коливається в межах $-6\dots-6,3^{\circ}\text{C}$ (табл. 1). У долинах північного Передкарпаття часто застоюється холодне повітря, формуючи так звані “острови холоду” з тривалими морозами (Шаблій та ін., 1998). Узимку в заглиблених гірських місцевостях погода буває холоднішою, ніж на схилах вище.

Такий температурний режим сприяє появі туману та довшому збереженню снігового покриву в улоговинах. На південному макросхилі Карпат, навпаки, холодні повітряні маси з півночі мало проникають через бар’єр хребтів (Природа Закарпатської області, 1981). Тому Закарпаття загалом має м’якшу зиму: середні температури січня на рівнинах варіюються в межах $-2\dots-4^{\circ}\text{C}$, у передгір’ї $\sim -5^{\circ}\text{C}$, а на високогір’ї опускаються до $-7\dots-8^{\circ}\text{C}$ (Природа Закарпатської області, 1981). У нашому районі в січні на вершині Плай (1330 м) середня температура оцінюється приблизно в -8°C , а на рівні сіл у підніжжі (600 м) – наближається до -6°C . Абсолютний мінімум температур на г. Плай становив $-27,6^{\circ}\text{C}$, абсолютний максимум – $+26,9^{\circ}\text{C}$ за період спостережень (табл.2.1). Для порівняння, у Славську абсолютні

крайні температури складають приблизно -35°C і $+32^{\circ}\text{C}$ (Природа Львівської області, 1972).

Влітку температурні показники обох макросхилів також подібні, визначаються висотою та характером підстильної поверхні. Середня температура найтеплішого місяця (липня) біля підніжжя хребта $\sim +15...+16^{\circ}\text{C}$. У Славську стовпчики термометрів підіймаються до $+15,6^{\circ}\text{C}$, в Турці – $+16,0^{\circ}\text{C}$, на станції Латірка (пд. схил) $\sim +15,8...+16^{\circ}\text{C}$. Плай на значно більшій висоті (1330 м), тому липнева температура підіймається лише до $+11^{\circ}\text{C}$. Денний максимум на рівні 600 м у теплий період досягає $+30...+32^{\circ}\text{C}$, тоді як у високогір'ї коливається між $+20...+25^{\circ}\text{C}$. Улітку південні схили отримують більше сонячної радіації (особливо схили південної експозиції), тому локально можуть прогріватися сильніше вдень. Водночас вночі схили швидко віддають тепло, а прохолодніше повітря стікає долинами донизу.

Середньодобова температура вище ніж $+10^{\circ}\text{C}$ тримається в передгір'ях $\sim 4,5$ місяці (140 днів). Це сприяє росту букових лісів. Загальна тривалість безморозного періоду в долинах – близько 130–150 днів (квітень–вересень) (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Варто зазначити, що взимку в кліматі регіону проявляються часті відлиги: в середньому 40–45 днів з відлигою за зиму (Шаблій та ін., 1998). Під час зимових потеплінь температура повітря нерідко піднімається до $+5...+10^{\circ}\text{C}$ навіть у січні, а в лютому може досягати $+15^{\circ}\text{C}$ (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Ці відлиги негативно впливають на хвойні (смерекові) ліси й обмежують їхній природний ареал на північних схилах, де часті коливання температур (від морозу до відлиги) пошкоджують молоді пагони смереки (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Натомість для листяних лісів (дуба скельного, бука) такі умови менш критичні. Відмінності температурного режиму, тривалості безморозного періоду та зволоження між макросхилами разом із висотними, едафічними й орографічними чинниками впливають на формування породного складу лісових екосистем. На південному макросхилі в межах середньогір'я більшу роль відіграють букові ліси, тоді як на північному зростає участь ялиці та смереки (Стойко, 2000).

**Кліматичні показники станцій на північному й південному макросхилах
Вододільно-Верховинського хребта**

Метеостанція	Висота, м	Середня Т січня, °С	Середня Т липня, °С	Середня за рік, °С	Річна кількість опадів, мм
Славське (пн. схил)	~590	-6,5	+15,6	+5,2	967
Турка (пн. схил)	~600	-5,9	+16,0	+5,7	841
Латірка (пд. схил)	622	-6,3 ¹	+15,9 ¹	+5,5	~1100 ²
Плай (пд. схил, вершина)	1330	~-8 ³	~+11 ³	+3,1	1550

¹ Оцінено за даними метеостанції Нижній Студений (Закарпаття) – (Природа Закарпатської області, 1981).

² Оцінка, базована на середніх по високогір'ю Закарпаття (Стойко, 2000).

³ Оцінка для станції Плай за висотним градієнтом температур.

На рис. 2.1 наведено кліматограми станцій Славське та Латірка, які ілюструють річний перебіг температур та опадів на протилежних макросхилах. Видно, що температурний режим упродовж року має подібну форму на обох схилах: мінімум припадає на січень (-6...-7°C), максимум – на липень (+15...+16°C). Відмінності незначні – південна станція Латірка трохи тепліша наприкінці зими – напочатку весни. Це пришвидшує початок вегетації та танення снігу. Восени температури на південному боці теж дещо вищі, тому листопад там м'якший. Загалом весна на південь від головного вододілу починається на 1–2 тижні раніше, а осінні заморозки настають пізніше, ніж на північному схилі (Природа Закарпатської області, 1981).

Таким чином, клімат південного макросхилу можна охарактеризувати як більш м'який: середні температури зимових місяців там на 1–2° вищі, а тривалість безморозного періоду довша. Північний макросхил має дещо суворіші зими (особливо в безвітряних улоговинах) та трохи прохолодніше літо через більшу хмарність.

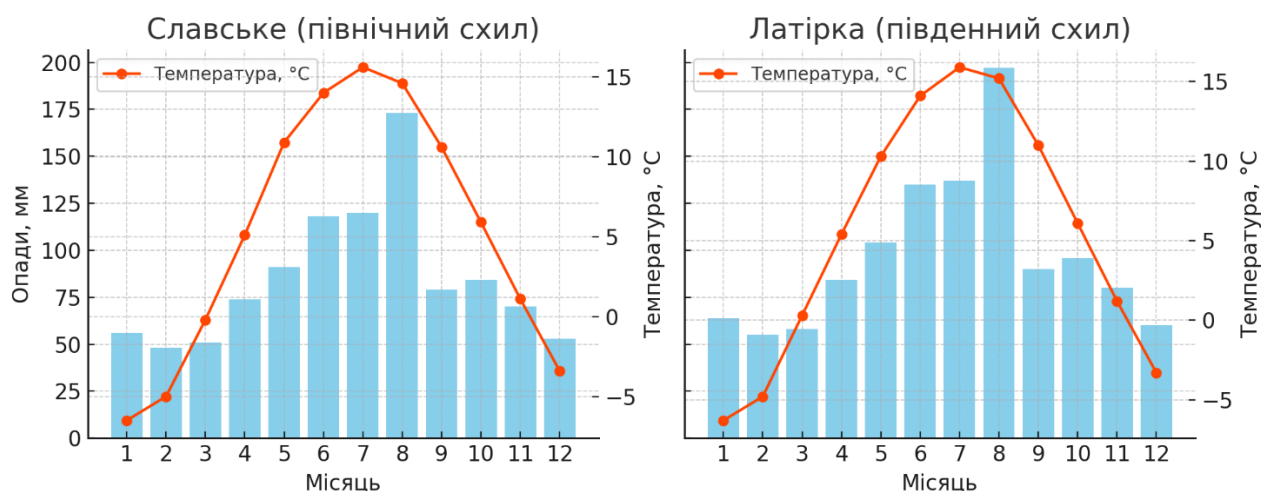


Рис. 2.1. Кліматограми (місячні температури і опади) станцій Славське (північний схил) та Латірка (південний схил) Вододільно-Верховинського хребта.

Орографічний бар'єр Вододільно-Верховинського хребта значно впливає на розподіл опадів. Загалом Українські Карпати належать до вологої кліматичної зони, де за рік випадає від 700 мм (передгір'я) до 1600 мм (на високогір'ї) опадів (Стойко, 2000). Максимальні значення спостерігаються на навітряних схилах і вершинах головного карпатського хребта. У нашому регіоні південний макросхил виступає навітряним відповідно до панівних західних і південно-західних повітряних потоків із Атлантики (Стойко, 2000). Тому Закарпатський бік отримує більше опадів, ніж північний (причорногірський) схил, який опиняється частково у “тіні” хребта. За даними С.М. Стойка (2000), середньорічна кількість опадів на південному схилі може перевищувати показники північного на 10–20% і більше. Наприклад, на метеостанції Руська Мокра (640 м н.р.м., Закарпаття) річна сума опадів становить ~1600 мм, тоді як на високогірній полонині Пожижевській (1429 м, Івано-Франківщина) – 1491 мм (Стойко, 2000). Навіть порівняно з нижчими передгірними районами різниця суттєва: у районі контакту із Карпатами (Передкарпаття) випадає до ~800 мм за рік, а переходячи через вододіл на Закарпаття, річні суми зростають до 1000 мм і більше. У таблиці 1 наведені відповідні показники для наших станцій: Славське – 967 мм, Турка – 841 мм, Латірка (розрахунково) ~1100 мм, Плай – 1550 мм. Отже, на південному макросхилі (особливо на висотах понад 1000 м) атмосферні опади значно

інтенсивніші.

Режим випадання опадів має виражений сезонний характер і подібний на обох макросхилах. Близько 60–70% річної суми приходить на теплий період року (квітень–вересень), максимумами – влітку. За багаторічними даними, найвологіші місяці – червень і липень (90–130 мм на місяць у передгір'ї) (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). На північному схилі середній максимум опадів припадає на липень (напр., Славське – 120 мм), тоді як на південному – часто на червень (наприклад, метеостанції на Полонинському хребті фіксують пік опадів у червні) (Природа Закарпатської області, 1981). Іноді в горах трапляються надзвичайно інтенсивні зливи: за добу може випасти понад 100 мм опадів, іноді навіть 200 мм (Стойко, 2000). Протягом 1900 – 1966 рр. у Карпатах зафіксовано понад 150 випадків добових опадів >100 мм. Такі зливи викликають селеві потоки та паводки. Прикладом є серпень 2008 року, тоді на північних схилах випало рекордно багато дощу (в Славську сумарно ~173 мм за місяць), що спричинило катастрофічний паводок на річках Карпат (Стойко, 2000). Значна частина опадів улітку має зливовий характер і випадає під час гроз (у передгір'ях влітку буває 8–10 грозових днів щомісяця) (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Відносна вологість повітря в теплий сезон досить висока (середньо 75–85%), часто утворюються тумани. На північному схилі (Славське) тумани особливо часті влітку – до 15 днів щомісяця, натомість у північному передгір'ї (наприклад, Стрий) лише 1–3 дні на місяць (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Це пояснюється здебільшого нічним охолодженням повітря в гірських долинах і конденсацією вологи. На відкритих південних схилах схожа картина: у долинах Закарпаття тумани рідкісні, тоді як у вузьких міжгір'ях (Руська Мокра, Турбат та ін.) теж часто стоять хмари і мряка.

Важливо зазначити, що більша кількість опадів на закарпатському макросхилі поєднується з інтенсивнішим поверхневим стоком і підвищеним ризиком повеней. Швидке танення снігу на півдні навесні (через тепліший клімат і домінування листяних лісів) призводить до одночасного сходження значних мас води, а якщо

накладаються зливи – виникають паводки (Стойко, 2000).

Таким чином, кліматичні особливості південного макросхилу (велика кількість опадів, різкі відлиги) вимагають особливої уваги до протипаводкових заходів у

Сніговий режим у районі дослідження тісно пов'язаний із температурними умовами та режимом опадів. Формування стійкого снігового покриву в горах зазвичай відбувається у другій половині зими, хоча перший сніг на вершинах може з'являтися вже наприкінці вересня(Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). На північному макросхилі (Сколівські Бескиди, Славсько) постійний сніговий покрив встановлюється в грудні, а в гірських долинах – наприкінці листопада(Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Середня висота снігу в долинах Передкарпаття становить 20–30 см, у середньогір'ї – 40–60 см, а на високогір'ї може сягати 80–100 см (Природа Львівської області, 1972). Зима в регіоні відносно м'яка, тому часті відлиги призводять до просідання та переривчастості снігового покриву. У січні часто випадають дощі, які ущільнюють сніг. Середня тривалість періоду зі сніговим покривом на північних схилах – близько 100–110 днів у передгірських долинах і до 130 днів на вершинах(Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Так, у Славську сніг лежить приблизно з початку грудня до кінця березня (приблизно 4 місяці). На вершинах хребта (г. Плай) сніговий покрив може зберігатися з листопада до початку травня, тобто ~6 місяців. Працівники метеостанції «Плай» відзначають, що взимку снігу нерідко намітає до вікон і даху будівлі станції (Україна Молода, 2018). Плай належить до сніголавинних станцій: тут ведуться детальні спостереження за висотою снігу та лавинною небезпекою. Найбільше накопичення снігу на крутих схилах і в карнизах відбувається в січні-лютому, коли можливі сходження снігових лавин.

На південному макросхилі сніговий покрив, як правило, менш стійкий. Тепліший клімат Закарпаття і часті фени (сухі теплі вітри) взимку спричиняють інтенсивне танення снігу на відкритих південних схилах (Природа Закарпатської області, 1981). Якщо на північних затінених схилах букові та хвойні ліси затримують сніг до квітня, то на південних оголених ділянках сніг може зійти вже в березні. За спостереженнями, на висотах 600–1000 м південного схилу сніг повністю сходить у

третій декаді квітня, а вище 1000 м – на початку травня(Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Тобто сніговий сезон на південному макросхилі в середньому на 2–3 тижні коротший, ніж на північному. Крім того, взимку через часті відлиги й дощі на південній стороні сніг часто перетворюється на мокрий і важкий, що спричиняє сніголами – обламування гілок і дерев під вагою налиплого мокрого снігу(Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). У цілому північний макросхил Вододільного хребта має більш тривалий і стійкий сніговий покрив, тоді як південний – меншу тривалість залягання снігу та часті перерви внаслідок відлиг. Ці відмінності важливі для гідрологічного режиму: на півночі поступове танення снігу живить річки довше, а на півдні швидке танення може спричиняти різкі підйоми рівнів води навесні.

Вітрові умови району визначаються як загальною циркуляцією атмосфери, так і місцевим рельєфом. У середньому протягом року над Карпатами переважає західний переніс повітряних мас(Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Це зумовлено домінуванням Ісландського мінімуму та Азорського максимуму, які сприяють заходу циклонів і атлантичних повітряних потоків у наші широти (Андріанов, 1968). На території Вододільно-Верховинського хребта протягом року найчастіше фіксуються вітри західних румбів. За даними спостережень, у зимовий сезон понад 40% становлять західні та південно-західні вітри, а влітку – західні та північно-західні (Шаблій та ін., 1998). Таким чином, південний макросхил є навітряним відносно переважних SW–W–NW потоків, а північний – частіше завітряним. Це позначається на швидкості вітру: у відкритих місцях південного схилу вітер сильніший. Середньорічна швидкість вітру на метеостанції Плай (~5,6 м/с) значно перевищує показники в підніжжі хребта. Наприклад, у Турці середня швидкість вітру становить 2,7 м/с, а в Славську – лише 1,8 м/с (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Різниця пояснюється не тільки експозицією, а й орографією: Славське розташоване у вузькій долині та захищене горами, тому там часто буває затишшя. Турка лежить у більш відкритій міжгірній улоговині, куди задувають вітри з долини Стрия, отже середня вітрова активність вища. На гірських хребтах вітер посилюється через перегин рельєфу: над вершинами формуються

турбулентні завихрення потоків. Взимку це призводить до перенесення снігу з відкритих просторів та утворення карнизів із навітряного боку схилів.

Місцеві вітри також характерні для гірського рельєфу. Влітку в долинах простежується режим гірсько-долинної циркуляції: вдень повітря піднімається схилами (анабатичні вітри), а вночі стікає долинами (катабатичні вітри) (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). На крутих північних схилах нічне стікання холодного повітря спричиняє формування "холодних полів" у долинах. На південному схилі денні бризи можуть бути відчутнішими, особливо на відкритих схилах, прогрітих сонцем. Взимку й на початку весни в Карпатах нерідко спостерігаються фенові явища – сухі теплі вітри, що дмуть із гір у долини під час проходження циклонів (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). Фени утворюються тоді, коли південний або південно-західний вологий потік, перетинаючи головний хребет, втрачає вологу на навітряному (південному) схилі у вигляді опадів, а коли спускається на північний бік, то прогрівається адіабатично й підсушує повітря. Такі фенові вітри на північному макросхилі викликають різке потепління та зниження відносної вологості повітря (Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди»). На південному макросхилі аналогічні явища теж трапляються, але рідше – здебільшого коли холодне важке повітря з півночі проривається через перевали в Закарпаття і спускається в долини у вигляді поривчастого вітру. Так, узимку по зниженнях (напр., через Ужоцький, Верецький перевали) холодне повітря інколи затікає на Закарпаття, спричиняючи різке похолодання в прилеглих долинах (Стойко, 2000). Проте загалом захищеність південної низовини Карпат горами з півночі робить клімат Закарпаття набагато м'якшим: сильні морози й штормові вітри там бувають значно рідше, ніж на відкритих просторах Передкарпаття.

2.3 Ґрунти району дослідження Вододільно-Верховинського хребта

Вододільно-Верховинський хребет займає центральне положення в межах Східних Бескидів, формуючи головний гідрологічний рубіж між басейнами Сяну та Тиси. Геологічну основу становить крейдово-палеогеновий фліш — чергування пісковиків,

алевролітів, аргілітів і мергелів, що створює переважно щебенисті, добре дреновані породи, на яких розвиваються ґрунотвірні процеси (Позняк, 2012). Клімат району вологий, помірно континентальний, зі значним річним балансом опадів (від 900 мм на північному макросхилі до 1200 мм — на південному). Ці умови, у поєднанні з крутими схилами та інтенсивним стоком, формують промивний тип водного режиму, що зумовлює вилуговування основ та утворення кислих бурих ґрунтів (Геренчук, 1972; Геренчук, 1981).

Провідним типом ґрунтів району є бурі гірсько-лісові ґрунти (буроземи), які формуються під покривом букових, ялицево-смерекових і буково-ялицевих лісів у межах висот 600–1200 м н.р.м. (Геник та ін., 2011). У профілі бурозему зазвичай виділяють гумусово-акумулятивний темно-бурий горизонт (5–15 см) із гумусом гуматно-фульватного типу, перехідний бурий горизонт і материнську породу — щебенистий фліш. Реакція середовища — кисла (рН 3,8–5,0), насиченість основами — низька, переважають кальцієво-водневі катіони у вбирному комплексі (Позняк, 2019). Вміст гумусу становить 3–5 %, що характерно для буроземів Центральних і Східних Карпат (Позняк, 2012; Геник та ін., 2011). У високогірній частині (вище 1200 м) під субальпійськими луками формуються гірсько-лучні буроземи із потужним дерновим горизонтом, де вміст гумусу досягає 8 % (Паньків, Яворська, 2016).

На нижчих гіпсоморфологічних рівнях, де спостерігається акумуляція вологи, розвиваються бурі гірсько-лісові опідзолені та оглеєні ґрунти, які мають слабо вибілений елювіальний горизонт і бурий ілювіальний із ознаками оглеєння (Гаськевич та ін., 2011). Процеси буроземоутворення й підзолистості тісно переплітаються; тому в більшості випадків формується перехідний тип із домінуванням буроземного процесу. Згідно з класифікацією FAO (2020), такі ґрунти належать до типу *Cambisols* або *Dystric Cambisols*.

Південний макросхил, обернений до Закарпатської низовини, вирізняється теплішим і більш вологим кліматом: середньорічна температура становить +6...+7 °С, а кількість опадів сягає 1100–1300 мм на рік (Геренчук, 1981). Такі умови стимулюють активне вивітрювання та вилуговування, що сприяє формуванню бурих гірсько-лісових типових ґрунтів із добре вираженим гумусовим горизонтом.

Основними ґрунтотвірними породами тут є делювіально-пролювіальні відклади флішу, пісковики та алевроліти, насичені уламками кварцу й слюд (Геренчук, 1981).

Ґрунти цього схилу формуються переважно під буковими та ялицево-буковими пралісами, у яких відбувається інтенсивне гумусоутворення типу *moder* — помірно кислий, добре структурований гумус (Леневич, Марискевич, 2014; Labaz et al., 2014). Товщина підстилки становить 3–5 см, гумусово-акумулятивного горизонту — до 30 см. Поєднання відносно високих температур, значного зволоження та надходження листяного опаду створює специфічні умови для трансформації органічної речовини й функціонування ґрунтової біоти. Інтенсивність цих процесів залежить від температурного та водного режимів ґрунту, його гранулометричного складу, дренажності й властивостей органічного субстрату (De Vos et al., 2015). Проте крутосхиловий рельєф сприяє ерозії: поширені змиті буроземи, особливо на ділянках вирубок і лісових доріг (Гаськевич та ін., 2011).

У приполонинських ділянках (вище 1200 м) трапляються буроземно-оглеєні та гірсько-лучні ґрунти із частковим оглеєнням нижнього горизонту внаслідок застою талих вод. Тут накопичується більше органічного вуглецю: за оцінками FAO (2020), подібні буроземи можуть утримувати 70–90 т С ha⁻¹ у верхніх 50 см профілю. Це робить ґрунти південного макросхилу важливими депо органічного вуглецю, що відіграє роль у кліматичній регуляції (Djukic et al., 2010).

Північний схил має прохолодніший і дещо посушливіший клімат (середньорічна температура +5 °С, опади 850–1000 мм), меншу інсоляцію та триваліший період снігового покриву (Геренчук, 1972). Рослинність тут представлена переважно смереково-ялицевими та ялиново-буковими лісами, де панує кислий *мор-*тип гумусу. Це призводить до утворення бурих гірсько-лісових опідзолених ґрунтів, у яких виражене світле елювіальне забарвлення верхнього шару (Позняк, 2012).

Профіль таких ґрунтів характеризується слабким поділом на горизонти: під підстилкою (5–8 см) залягає бурий гумусово-елювіальний горизонт А (10–15 см), далі — ілювіальний буро-жовтий горизонт В із включеннями оксидів Fe та Al. Глибше, на 40–60 см, спостерігається оглеєння через застій води після танення снігу (Геник та ін., 2011). У нижніх частинах схилів поширені буроземи оглеєні, у яких рівень

глейового горизонту підвищується до 30–40 см.

Унаслідок переважання хвойного опаду профіль має більш кислу реакцію (рН 3,5–4,2), низьку насиченість основами (до 30 %), менший вміст кальцію й магнію. Буроземи під ялиновими лісами в Центральній Європі містять менше стабільного гумусу та мають меншу здатність акумулювати органічний карбон, ніж під листяними. Аналогічна тенденція спостерігається і на північному макросхилі Вододільно-Верховинського хребта: вміст органічного С у верхньому горизонті не перевищує 3,5 %, тоді як на південному — до 5 % (De Vos et al., 2015).

Ґрунти північного схилу більш схильні до ерозії через історичні вирубки смерекових лісів. Це призвело до поширення змитих буроземів і утворення на осипищах ініціальних гумусових ранкерів — молодих тонких ґрунтів із потужністю профілю до 20 см (Паньків, Яворська, 2016). За спостереженнями Туренка (1998), такі ґрунти є першими стадіями ґрунотворення на гірських осипищах і демонструють низьку буферність до кислотності. Унаслідок переважання хвойного опаду ґрунти північного макросхилу характеризуються більш кислою реакцією середовища, нижчою насиченістю основами та меншим вмістом кальцію і магнію. Поєднання прохолодніших умов, тривалішого сніголежання та особливостей складу рослинного опаду впливає на інтенсивність трансформації органічної речовини та формування гумусового профілю ґрунтів (Позняк, 2012; De Vos et al., 2015).

Обидва макросхили належать до однієї буроземної провінції, однак різняться мікрокліматом і рослинністю, що відображається у ґрунотвірних процесах. На південному схилі буроземний процес відбувається активніше: ґрунти глибші, з м'якшою кислотністю та більшим вмістом гумусу. Під буковими пралісами переважає гумус типу *модер*, а профіль однорідно бурий без вираженого елювію (Позняк, 2019; Геренчук, 1981). На північному схилі за домінування хвойних лісів гумус — типу *мор*, що призводить до збільшення кислотності, формування елювіально-ілювіального поділу профілю та слабшого насичення основами.

Отже, ґрунтовий покрив обох макросхилів сформований переважно бурими гірсько-лісовими ґрунтами, однак відмінності кліматичних умов, експозиції, характеру рослинності та інтенсивності схилових процесів зумовлюють

варіабельність їхніх морфологічних і фізико-хімічних властивостей. На південному макросхилі тепліші та вологіші умови сприяють активнішому перебігу процесів вивітрювання і трансформації органічної речовини, тоді як на північному більшу роль відіграють нижчі температури, триваліше сніголежання та значніша участь хвойного опаду. Збереження природного лісового покриву є важливим чинником стабільності ґрунтів на обох макросхилах (Позняк, 2019; Генік та ін., 2011).

2.4 Рослинний покрив району дослідження Вододільно-Верховинського хребта

Вододільно-Верховинський хребет (Українські Карпати) характеризується високою лісистістю та пануванням гірських лісових екосистем. Значна частина території вкрита лісами, особливо на південному макросхилі: Закарпатська область є одним з найбільш заліснених регіонів України (лісистість ~51%) (Лакида та ін., 2013). На північному макросхилі (Львівська область) частка лісів дещо менша, але все одно суттєва (Геренчук, 1972). Основними типами рослинності є змішані хвойно-широколистяні ліси, що типові для Вододільно-Верховинської області Українських Карпат (Шпаківська, Рожак, 2013). За геоботанічним районуванням ця територія належить до району ялиново-букових і ялицево-ялиново-букових лісів (Шпаківська, Рожак, 2013). Тобто домінують угруповання з ялиною європейською (*Picea abies*, місцева назва – смерека), буком лісовим (*Fagus sylvatica*) та ялицею білою (*Abies alba*) у різних співвідношеннях.

Сучасний рослинний покрив хребта сформувався протягом голоцену в процесі післяльодовикової сукцесії та зміни кліматичних фаз (Криницький, Третяк, 2003). У ранньому голоцені переважали тундрові й лісотундрові спільноти, які з потеплінням атлантичного періоду (8–4,5 тис. р. тому) були замінені мішаними широколистяними лісами з дуба, в'яза, клена, ясеня та ін. (Криницький, Третяк, 2003). У суббореальний період (близько 4–2,5 тис. р. тому) в Карпати поширилися граб і бук, а в субатлантичному періоді (понад 2 тис. р. тому) бук став домінантом гірських схилів разом із ялицею, сформувавши сучасну горизонтальну та вертикальну структуру рослинного покриву Карпат (Криницький, Третяк, 2003).

Таким чином, історично склалася виражена поясність рослинності та сучасний склад лісів.

Лісові ландшафти хребта зазнали помітного впливу людини в минулі століття. На передгір'ях ще в давнину застосовувалась вогнева система землеробства, яка призводила до великих лісових пожеж і зміни породного складу насаджень (Криницький, Третяк, 2003). Важкі насінини таких видів як смерека, ялиця та дуб погано поновлювалися на згарищах, тому їхнє місце посідали породи з легким насінням – граб, клен, береза, осика тощо (Криницький, Третяк, 2003). У ХІХ ст. масштабні суцільні рубання майже повністю ліквідували праліси в доступних районах, після чого у ХХ ст. практикувалися штучні монокультури смереки (на верхніх схилах) та дуба (на передгір'ях) (Криницький, Третяк, 2003). Це спричинило спрощення структури лісів і зниження їхньої стійкості до хвороб та шкідників. Сучасні ліси району є переважно вторинними, сформованими вже після тих історичних впливів, проте вони зберігають високу біопродуктивність та екологічне значення. Зокрема гірські ліси виконують важливі ґрунто- та водозахисні функції: порушення їхньої цілісності призводить до інтенсивної ерозії ґрунтів, селевих потоків і катастрофічних паводків (Криницький, Третяк, 2003).

Флора Вододільно-Верховинського хребта відзначається значним багатством видів і поєднує елементи різного походження. У складі рослинного покриву є центральноєвропейські лісові види, бореальні (тайгові) елементи на верхніх висотах, а подекуди й релікти льодовикової епохи. Наприклад, у складних ялицево-букових пралісах Карпат налічується понад 170 видів судинних рослин, із яких кілька належать до рідкісних і зникаючих (6 видів занесено до Червоної книги України) (Криницький, Третяк, 2003). Навіть у нижчопоясних ялицево-дубових лісах Передкарпаття флористичне різноманіття дещо менше – близько 140 видів (Криницький, Третяк, 2003). Це свідчить про високу флористичну насиченість гірських лісів хребта й значну різноманітність екологічних ніш.

Серед характерних представників флори – неморальні широколистяні породи й трави буково-ялицевих лісів (як-от: ряст порожнистий *Corydalis cava*, первоцвіт весняний *Primula veris*, маренка запашна *Galium odoratum*), а також бореальні види

хвойних лісів (чорниця *Vaccinium myrtillus*, брусниця *Vaccinium vitis-idaea*, щититник сколопендровий *Polystichum lonchitis* та ін.). У весняний період під пологом бука масово цвіте білий підсніжник (*Galanthus nivalis*) і черемша (*Allium ursinum*), які охороняються законом (Rizun et al., 2024). На субальпійських луках та узліссях трапляється ендемічний для Карпат крокус Гейфелів (*Crocus heuffelianus*), відомий як “карпатська шафранова квітка” (Rizun et al., 2024). До складу флори регіону входять і рідкісні реліктові види: наприклад, у високогір’ї збереглися осередки аркто-альпійських видів, таких як сон широколистий (*Pulsatilla patens*) і рододендрон карпатський (*Rhododendron myrtifolium*), які пережили льодовиковий період в Карпатах.

Окрім основних панівних порід, у флорі трапляються й менш поширені деревні види. У передгірних районах і долинах річок на південному макросхилі іноді трапляються ділянки липово-дубових лісів, у яких простежується наявність липи серцелистої (*Tilia cordata*) (Januszek et al., 2006). Хоча такі ліси (асоціація *Tilio-Carpinetum*) є великою рідкістю для Карпат, їхня присутність збагачує біорізноманіття краю. Відзначено, що під наметом липняку формується товстіший шар листової підстилки та кращі умови для ґрунтових мікроорганізмів порівняно з буковим лісом (Januszek et al., 2006). Поєднання різних флористичних елементів – від теплолюбних дубових до холодостійких субальпійських – визначає унікальність і різноманітність рослинного покриву Вододільно-Верховинського хребта.

Вертикальна поясність

Рослинність хребта чітко диференційована по висотних поясах під впливом зміни кліматичних умов з підняттям над рівнем моря. Можна виділити кілька основних висотних поясів: передгірний (нижньогірний) пояс мішаних широколистяних лісів, середньогірний пояс букових і ялицево-букових лісів, верхньогірний пояс хвойних (смерекових) лісів, а вище – субальпійський пояс чагарникового криволісся і луків.

На висотах до ~500–600 м н.р.м. по північних схилах хребта збереглися фрагменти дубово-букових і грабово-дубових лісів, що є перехідними від рівнинної до гірської рослинності (Геренчук, 1972). Тут домінує дуб звичайний (*Quercus robur*

або *Q. petraea* в передгір'ї), з домішками граба звичайного (*Carpinus betulus*), бука та ялиці. На більш стрімких схилах і вище (600–1000 м) переходять у букові ліси. Пояс букових лісів особливо виражений на південному макросхилі, де бук може формувати чисті насадження до висот ~1100–1200 м завдяки м'якшому та вологішому клімату (Геренчук, 1981). На північних схилах у тому ж висотному інтервалі букові ліси мають значну домішку ялиці білої, утворюючи ялицево-букові ліси (Криницький, Третяк, 2003). Таким чином, у середньогір'ї спостерігається закономірна зміна: чисті букові ліси на півдні – проти ялицево-букових на північних експозиціях (Криницький, Третяк, 2003).

Вищий гірський пояс (близько 1000–1300 м) представлений смереково-ялицево-буковими лісами. (Геренчук, 1981). На висотах близько 1200–1400 м н.р.м. відзначається верхня межа деревостанів, вище якої зімкнутий ліс поступово розріджується. У цих умовах з'являється пояс пригнічених низькорослих кривих дерев – субальпійське криволісся. Його утворюють переважно чагарникові форми деревних порід: на схилах – зарості вільхи зеленої (*Alnus viridis*, локальна назва – "душекія") та подекуди гірської сосни (*Pinus mugo*, жереп) (Криницький, Третяк, 2003). У місцях, де ґрунти глибші, до криволісся можуть домішуватися пригнічені екземпляри бука або смереки, але здебільшого це суцільні непрохідні зарості чагарника заввишки 2–4 м. Криволісся виконує важливу протиерозійну роль, захищаючи ґрунт верхньогір'я від змиву.

Над лісом, приблизно вище 1400 м, розташований субальпійський пояс лучної рослинності. Це простори відкритих високогірних лук – полонин, які вкриті різнотрав'ям і злаками, пристосованими до суворих умов (низьких температур, сильних вітрів). Тут домінують жорстколисті злаки (*Nardus stricta*, *Festuca picta*), подекуди трапляються яскраві квіти, як-от: арніка гірська (*Arnica montana*), волошка карпатська (*Centaurea carpatica*), дрібні види рододендрону, вересу та інші. Субальпійські луки часто перемежовані з ділянками криволісся на різних експозиціях. Вище поодинокі скельні виходи й осипища несуть фрагменти альпійської рослинності (лишайники, мохи, низькорослі трави), але абсолютні висоти Вододільно-Верховинського хребта (максимально близько 1400–1500 м) не

утворюють вираженого альпійського поясу.

Вертикальна диференціація рослинного покриву Вододільно-Верховинського хребта має виражений, але мозаїчний характер і залежить не лише від абсолютної висоти, а й від експозиції та крутизни схилів, ґрунтових умов і історії землекористування. У нижній та середній частинах схилів переважають букові й мішані ялицево-букові ліси, тоді як із підняттям у деревостанах зростає участь смереки. Поблизу верхньої межі лісу трапляються розріджені деревостани та фрагменти криволісся. Відкриті лучні угруповання полонин сформовані як під впливом природних висотних обмежень поширення лісу, так і внаслідок тривалого господарського використання високогірних і приполонинських територій. Тому сучасна верхня межа лісу та поширення лучної рослинності не завжди відповідають виключно кліматично зумовленій висотній поясності..

Домінантами деревостану лісів Вододільно-Верховинського хребта є три основні породи: бук лісовий (*Fagus sylvatica*), ялина європейська (смерека) (*Picea abies*) та ялиця біла (*Abies alba*). У різних комбінаціях і співвідношеннях вони утворюють основні типи лісу в регіоні. Загалом бук представляє твердолистяну компоненту, а ялина та ялиця – хвойну компоненту карпатських лісів, забезпечуючи багаторушність і мішаний характер деревостану.

Букові ліси домінують на тепліших схилах і нижчих висотах. Бук лісовий формує монодомінантні насадження (особливо на південних макросхилах), а також є головною складовою мішаних лісів. Його участь у деревостанах регіону дуже висока – він забезпечує густий полог і багату підстилку, створюючи специфічні умови для підліску та ґрунту. У темно-букових лісах практично відсутній трав'яний покрив, зате під наметом бука часто росте густий шар букових сіянців і тіньовитривалих трав (Криницький, Третяк, 2003).

У чистому вигляді смерекові ліси займають вологі прохолодні верхівки хребтів і стрімкі схили. У таких умовах смерека формує темнохвойні високопродуктивні насадження. Проте монокультури смереки на непритаманних їй висотах (закладені людиною в минулому) виявилися нестійкими – спостерігалися масові всихання середньовікових смеречників на нижній межі їхнього поширення, викликані

грибковими захворюваннями та шкідниками (Криницький, Третяк, 2003). Оптимальні умови для смереки – це верхній лісовий пояс ($\approx 1000\text{--}1300$ м), де вона успішно конкурує з іншими видами. Зараз у межах хребта природні смеречники чергуються з мішаними ялиново-буково-ялицевими лісами, створюючи мозаїку типів лісу.

Ялиця потребує досить м'якого клімату і стабільної вологості ґрунту; ці умови забезпечуються на північних макросхилах із частими опадами і довшим сніголежанням (Геренчук, 1981). У змішаних ялицево-букових лісах ялиця може становити 10–30% від складу деревостану, іноді утворюючи другий ярус під пологом бука (Шпаківська, Рожак, 2013). Ялиця біла є важливим компонентом мішаних буково-ялицевих і ялицево-буково-смерекових деревостанів. Її участь впливає на вертикальну структуру насаджень, світловий режим під наметом і склад лісової підстилки, а отже — опосередковано на умови трансформації органічної речовини.

У сучасних лісових екосистемах хребта переважають мішані насадження зі співдомінуванням згаданих видів. Так, дослідження у Стрийсько-Сянській Верховині (північний макросхил) показали різноманітні комбінації складу деревостану: від ялиново-букових (приблизно 9:1 за участю смереки й бука) до ялицево-буково-ялинових (близько 4:4:2 відповідно) та навіть буково-дубово-ялинових на нижній межі (Шпаківська, Рожак, 2013). У верхньому поясі трапляються майже чисті смеречники (до 90% смереки), особливо на південних і гребневих ділянках, де бук вже не витримує кліматичних умов (Шпаківська, Рожак, 2013). Таким чином, породний склад лісів хребта є складним мозаїчним, але всюди головну роль відіграють бук, смерека та ялиця. Це домінанти, які визначають структуру фітоценозів, об'єм фітомаси й виконують ключові екосистемні функції. За даними лісівничих оцінок, на них припадає ледь частка запасу деревини: по Україні в цілому частка бука серед твердолистяних становить $\sim 55\%$, а частка смереки серед хвойних $\sim 18\%$ за запасом фітомаси (Лакида та ін., 2013). У Карпатському регіоні ці показники ще вищі, що підкреслює провідне значення цих трьох порід у формуванні рослинного покриву району дослідження.

Лісові екосистеми північного і південного макросхилів

Умови зростання рослинності на північному та південному макросхилах хребта

помітно різняться. Це впливає на склад і структуру лісових екосистем. Північний макросхил (Львівщина) має більш континентальний клімат: дещо холоднішу зиму й помірно тепле літо, кількість опадів розподілена рівномірно, проте вологість повітря нижча порівняно з південним схилом. Сонячна радіація на північних схилах менша. Це створює прохолодніші та вологіші умови під пологом лісу. Південний макросхил (Закарпаття) знаходиться під впливом більш м'якого, субатлантичного клімату: тепліше літо, м'якша зима, повітряні маси з Середземномор'я приносять достатньо опадів. Ці відмінності зумовлюють різну вертикальну структуру лісів. На південному схилі буковий пояс ширший і піднімається вище, завдяки чому значні площі тут займають чисті букові праліси (Геренчук, 1981). Натомість на північному схилі вже з нижчих висот з'являється ялиця й домішується до бука, а смерека опускається дещо нижче по схилу. Як уже зазначалося, букові ліси на південних схилах проти ялицево-букових на північних у середньогір'ї (Криницький, Третяк, 2003). У високогір'ї північного макросхилу смерекові ліси можуть опускатися в балки та холодні експозиції, тоді як на південному схилі на тих самих висотах ще трапляється бук.

Ґрунтово-гідрологічні умови теж різняться. Північні схили накопичують більше снігу взимку, який повільніше тане навесні, забезпечуючи кращий ґрунтовий дренаж влітку. Це сприяє росту ялиці та смереки, чутливих до посухи. Південні схили швидше прогріваються, тут ґрунти часто бурі лісові, насичені перегноєм, завдяки багатому листяному опаду бука. Букові ліси на Закарпатті більш продуктивні та швидкорослі, зі значною часткою тіньлюбних видів у підліску (Геренчук, 1981). На Львівському макросхилі умови суворіші, тому деревостани ростуть повільніше, але мають вищу щільність деревини й більший запас на одиницю площі (за рахунок домішки хвойних).

Помітні й відмінності в лісовій фауні та мікробіоті ґрунтів двох макросхилів, опосередковані рослинністю. Так, у букових лісах півдня ґрунтові мікроорганізми активніші завдяки товстому шару листя, тоді як у ялицево-смерекових лісах півночі підстилка розкладається повільніше, що впливає на колообіг речовин (Januszek et al., 2006). Проте в обох випадках ліси виконують подібні екосистемні функції: водорегулювальні, кліматорегулювальні, рекреаційні та інші, забезпечуючи

екологічну рівновагу в регіоні.

Відмінності кліматичних, орографічних і ґрунтових умов між макросхилами відображаються у складі та структурі лісових угруповань. На південному макросхилі більшу роль відіграють букові ліси, тоді як на північному зростає участь ялиці та смереки. Відмінності у видовому складі деревостанів, структурі лісової підстилки, мікрокліматі та ґрунтових умовах можуть впливати на надходження, трансформацію й накопичення органічної речовини в компонентах лісових екосистем.

Отже, північний і південний макросхили Вододільно-Верховинського хребта характеризуються різними комплексами екологічних умов та структурою лісового покриву. Ці відмінності створюють передумови для неоднакового перебігу процесів акумуляції та трансформації органічного Карбону і мають бути враховані під час порівняльного аналізу досліджуваних старовікових лісових екосистем.

Висновки до розділу 2

Вододільно-Верховинський хребет характеризується значною просторовою неоднорідністю природних умов, зумовленою поєднанням орографічних, кліматичних, геологічних, ґрунтових і біотичних чинників. Важливою особливістю території є виражена асиметрія північного та південного макросхилів, яка проявляється у відмінностях рельєфу, температурного режиму, кількості опадів, тривалості снігового покриву та характеру зволоження.

Ґрунтовий покрив досліджуваної території представлений переважно бурими гірсько-лісовими ґрунтами, властивості яких змінюються залежно від висоти, експозиції схилів, літологічної основи, характеру рослинності та водного режиму. Відмінності між макросхилами створюють неоднакові умови для гумусоутворення, трансформації органічної речовини та функціонування ґрунтової біоти, що потенційно може впливати на формування запасів органічного Карбону.

Рослинний покрив Вододільно-Верховинського хребта має виражену висотну й експозиційну диференціацію та представлений переважно буковими, ялицево-буковими, смереково-ялицево-буковими і смерековими лісами. Південний макросхил характеризується більшою участю букових лісів, тоді як на північному зростає роль

ялиці та смереки. Відмінності породного складу, структури деревостанів, характеру лісової підстилки та мікроклімату можуть визначати різну інтенсивність надходження й трансформації органічної речовини в лісових екосистемах.

Старовікові ліси досліджуваної території сформувалися в умовах тривалої взаємодії природних чинників за відносно незначного сучасного антропогенного впливу. Саме тому вони є придатними об'єктами для оцінювання природних закономірностей акумуляції та перерозподілу органічного Карбону між основними компонентами лісової екосистеми.

Отже, північний і південний макросхили Вододільно-Верховинського хребта характеризуються відмінними комплексами екологічних умов, які можуть визначати особливості формування карбонових запасів у старовікових лісах. Це обґрунтовує необхідність їх порівняльного дослідження та оцінювання ролі кліматичних, орографічних, ґрунтових і фітоценотичних чинників у процесах акумуляції органічного Карбону.

РОЗДІЛ 3. ДІЛЯНКИ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Ділянки досліджень

Вибір ділянок досліджень здійснювали на основі попереднього аналізу супутникових знімків у програмі Google Earth та польового обстеження території. Район досліджень охоплював частину Вододільно-Верховинського хребта від г. Пікуй до г. Журівка загальною протяжністю близько 12 км. Дослідні ділянки розташовані на висотах 750–1135 м н. р. м. і охоплюють північний та південний макросхили хребта. Ділянки досліджень північного макросхилу повністю лежать у межах НПП “Бойківщина”. Добре марковані туристичні стежки. Є стенди з інформацією, точки порятунку, місця відпочинку та кемпінгу, локації позначені на картах. Доволі потужна агломерація лісових доріг. Місцевість з довгими відрогами, більш пологим рельєфом ніж на південному макросхилі. Лісові екосистеми стиглі та пристигаючого типу. Фрагментарно збереглися ділянки з ознаками старовікового лісу. Ділянки приурочені до адміністративних меж таких населених пунктів: с. Верхнє Гусне та с. Либохора. На місцевості добре помітний антропогенний вплив.

Південний макросхил має крутий схил, складний рельєф, малу кількість відрогів. Лісова смуга відзначається малою шириною витягнутої приполонниної форми. Тип лісу – старовіковий із ознаками пралісу, великою кількістю грубих деревних залишків (їхніх завалів), вузькими (майже зарослими) стежками. Ділянки досліджень південного макросхилу приурочені до адміністративних меж таких населених пунктів: с. Біласовиця, с. Жденієво, с. Щербовець, с. Збини, с. Пашківці, с. Буковець, с. Перехресний, с. Кічерний, с. Розтока. Антропогенний вплив спостерігається значно в меншій мірі. Територія важкодоступна.

Для досліджень було закладено 26 пробних ділянок на північному та південному макросхилах Вододільно-Верховинського хребта. Ділянки охоплювали лісові екосистеми різного віку та ступеня природності, включно зі старовіковими лісами і ділянками пралісового типу, а також молодшими та стиглими деревостанами, використаними для порівняльного аналізу. Такий підхід дав змогу оцінити особливості формування запасів органічного Карбону залежно від віку деревостану та екологічних умов його формування.

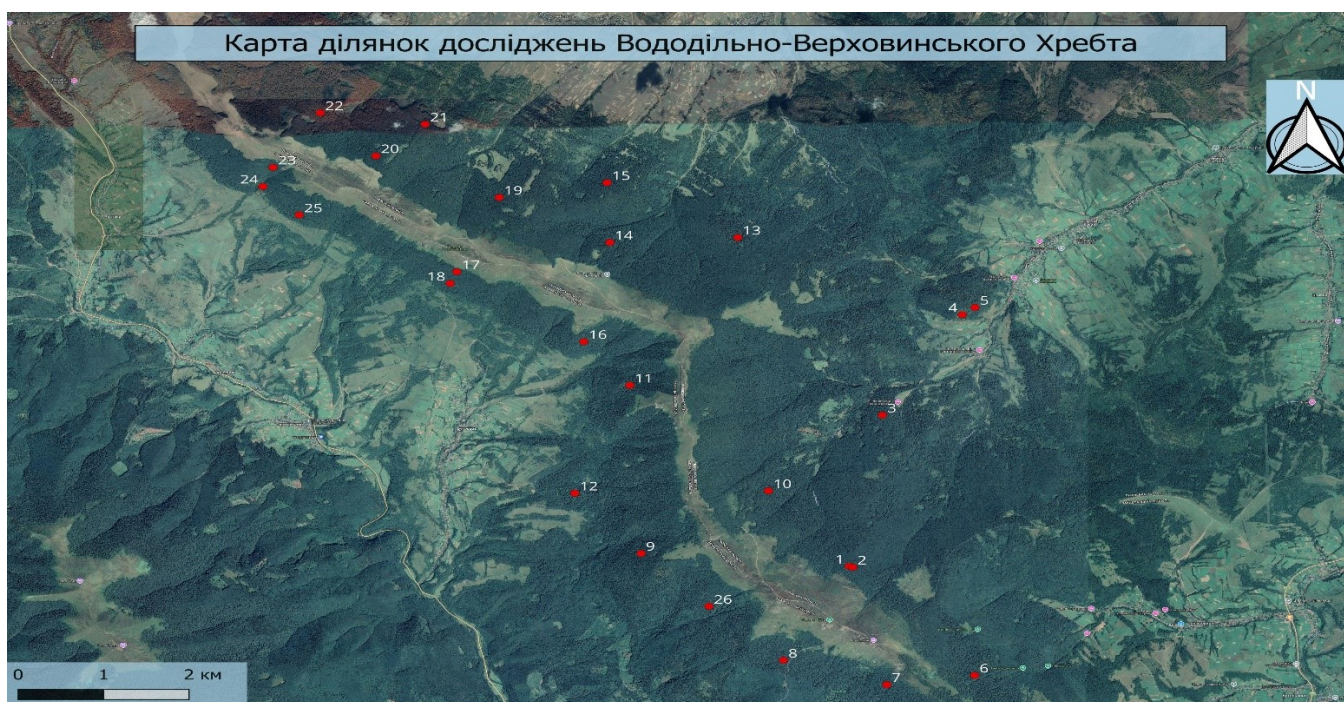


Рис. 3.1 Карта розташування ділянок досліджень Вододільно-Верховинського Хребта.

Описи ділянок

Ділянка досліджень №1

Деревостан складений буком лісовим (*Fagus sylvatica* L.).

Вік – 43 роки. Формула деревостану – 10Бк+Яв. Товщина підстилки – 1 см. Висота абсолютних відміток – 1115 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північно-східна. Ухил ділянки – 15°. Ділянка знаходиться на верхній межі лісу, приполонинна територія. Ділянка досліджень прилягає до туристичного шляху (лісова дорога) від с. Верхнє Гусне до г. Пікуй. Характеризується молодими буками у вікні природного поновлення. Шар підстилки малої потужності, бідні запаси грубих деревних залишків. Ґрунти – складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-2 см) гумусований горизонт бурого кольору з темно-сірим відтінком,

середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (2-12 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, добре ущільнений, малого ступеню зволоження, з активною кореневою системою;

Ph – (12-35 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеню зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №2

Складена буком лісовим (*Fagus sylvatica* L.) з домішками явора (*Acer pseudoplatanus*).

Вік – 80 років. Формула деревостану – 10Бк+Яв . Товщина підстилки – 1,5 см. Висота абсолютних відміток – 1100 м.н.р.м. Експозиція схилу – північно-східна. Ухил ділянки – 12°. Ділянка знаходиться на верхній межі лісу, приполонинній території. Ділянка досліджень прилягає до туристичного шляху (лісова дорога) від с. Верхнє Гуснє до г. Пікуй. Характеризується старовіковим буковим лісом. Шар підстилки невеликої потужності, значна кількість запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-10 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Ph – (10-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №3

Складена буком лісовим (*Fagus sylvatica* L.) із домішками явора (*Acer pseudoplatanus*).

Вік – 100 років. Формула деревостану – 10Бк . Товщина підстилки – 2,5 см. Висота абсолютних відміток – 890 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північно-західна. Ухил ділянки – 4°. Ділянка полого, знаходиться біля підніжжя хребта на його північному відрозі. Характеризується старовіковим буковим лісом. На території ділянки багато пнів, проте зімкнутість крон є доволі щільною. Ділянка досліджень прилягає до туристичного шляху (лісова дорога) від с. Верхнє Гусне до г. Пікуй. Шар підстилки великої потужності, значна кількість запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-12 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Ph – (12-35 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №4

Складена буком лісовим (*Fagus sylvatica* L.) із домішками ялини європейської (*Picea abies* Karst.).

Вік – 90 років. Формула деревостану – 8БкЛ2ЯлЕ+Яв. Товщина підстилки – 1,25 см. Висота абсолютних відміток – 813 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-східна. Ухил ділянки – 22°. Ділянка з крутим ухилом, знаходиться біля підніжжя хребта на його північно-східному відрозі. Це зруб лісу після вітровалу (3 роки тому). Характеризується різновіковим ялиново-буковим лісом. Лісова підстилка збереглася фрагментарно; вона розкладена, частково змита через площинний стік. Наявний трав'яний покрив. Ділянка досліджень знаходиться поруч із селом Верхнє Гусне. Велика кількість запасів грубих деревних залишків у зв'язку з вітровалом. Зафіксована спроба заліснення площі вітровалу саджанцями ялини європейської. Ґрунти – складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються

карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-2 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, сухий;

Ph – (2-20 см) перехідний у гірську породу, буровато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, сухий, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №5

Складена буком лісовим (*Fagus sylvatica* L.).

Вік – 90 років. Формула деревостану – 8БкЛ2ЯлЕ+Яв. Товщина підстилки – 2,5 см. Висота абсолютних відміток – 822 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-східна. Ухил ділянки – 19°. Ділянка з крутим ухилом, знаходиться біля підніжжя хребта на його північно-східному відрозі. Це старовіковий буковий ліс, який знаходиться біля ділянки після вітровалу. Шар підстилки великої потужності, значна кількість запасів грубих деревних залишків. Наявний трав'яний покрив. Ділянка досліджень знаходиться поруч із селом Верхнє Гусне. Значна кількість запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-6 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Ph – (6-31 см) перехідний у гірську породу, буровато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №6

Бучина біднопокровна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 190 років. Формула деревостану – 10Бк . Товщина підстилки – 2,5 см. Висота абсолютних відміток – 1023 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північно-східна. Ухил ділянки – 20°. Ділянка зі значним ухилом схилу. Знаходиться біля туристичної стежки, яка починається від с. Біласовиця і виходить до г. Пікуй. Це старовіковий буковий ліс типу пралісового з потужним шаром лісової підстилки, великою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-7 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (7-20 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою;

Ph – (20-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №7

Бучина біднопокривна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 170 років. Формула деревостану – 10Бк . Товщина підстилки – 1,5 см. Висота абсолютних відміток – 1115 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 30°. Ділянка зі значним ухилом схилу. Знаходиться біля г. Пікуй. До ділянки можна дійти гірською стежкою з с. Жденієво. Це старовіковий буковий ліс типу пралісового з густою зімкненістю крон, великою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-7 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (7-15 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою;

Ph – (15-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №8

Бучина біднопокривна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 190 років. Формула деревостану – 10Бк . Товщина підстилки – 2,0 см. Висота абсолютних відміток – 1045 м.н.р.м. Експозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 25°. Ділянка зі значним ухилом схилу. Знаходиться біля г. Пікуй. До ділянки можна дійти туристичною гірською стежкою із с. Щербовець. Це старовіковий буковий ліс типу пралісового зі значною потужністю лісової підстилки, невеликою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстиляються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-4 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, малого ступеня зволоження;

Нр – (4-16 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою;

Ph – (16-28 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору,

суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №9

Бучина біднопокривна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.) з домішками явора (*Ascer pseudoplatanus*). Вік – 200 років. Формула деревостану – 7Бк3Яв. Товщина підстилки – 1,2 см. Висота абсолютних відміток – 1090 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 20°. Ділянка зі значним ухилом схилу. Знаходиться біля г. Зелемений. До ділянки можна дійти туристичною гірською стежкою з с. Щербовець. Ділянка досліджень є приполонинною територією, яка знаходиться на південно-західному відрозі хребта. Це старовіковий буковий ліс типу пралісового зі значними домішками явора, малою потужністю лісової підстилки, великою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-5 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (5-10 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, вологий, з активною кореневою системою;

Рн – (10-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №10

Бучина біднопокривна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.).

Вік – 78 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 1,0 см. Висота абсолютних відміток – 1022 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північно-східна. Ухил

ділянки – 9°. Знаходиться біля г. Зелеменій із північного боку макросхилу. До ділянки можна дійти гірською стежкою з с. Верхнє Гусне. Це старовіковий буковий ліс із малою потужністю лісової підстилки, великою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-6 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (6-10 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, вологий, з активною кореневою системою;

Ph – (10-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №11

Бучина біднопокровна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.) з домішками явора (*Acer pseudoplatanus*). Вік – 200 років. Формула деревостану – 8Бк2Яв. Товщина підстилки – 1,5 см. Висота абсолютних відміток – 1075 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 20°. Ділянка з великим ухилом схилу, знаходиться на терасовидній місцевості між двома крутими схилами, над і під нею. Ділянка досліджень лежить на західному відрозі хребта, південного макросхилу г. Нондаг. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу від крайових стежок поблизу с. Буківець. Ділянка досліджень є приполонинною територією, яка знаходиться на південно-західному відрозі хребта. Це старовіковий буковий ліс типу пралісового з домішками явора, невеликою потужністю лісової підстилки, невеликою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-

делювіального походження.

Грунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-4 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (4-13 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою;

Ph – (13-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №12

Бучина ожинова

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 150 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 0.7 см. Висота абсолютних відміток – 848 м.н.р.м. Експозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 30°. Ділянка з великим ухилом схилу. Знаходиться на західному схилі хребта, південного макросхилу г. Нондаг. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу від крайових стежок поблизу с. Буківець. Це старовіковий буковий ліс типу пралісового, малою потужністю лісової підстилки, великою кількістю запасів грубих деревних залишків. Перехідного горизонту ґрунтового профілю Нр візуально не виявлено, оскільки ділянка була перезволожена після атмосферних опадів. Ґрунти – складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Грунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-4 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Ph – (4-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору,

суглинистий, добре ущільнений, вологий, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №13

Бучина ожиново-папоротева

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.) з домішками явора (*Acer pseudoplatanus*). Вік – 50 років. Формула деревостану – 6Бк4Яв. Товщина підстилки – 1,0 см. Висота абсолютних відміток – 1060 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північно-східна. Ухил ділянки – 2°. Ділянка вирівняна з мінімальним ухилом, знаходиться на терасовидній місцевості на північно-східному відрозі хребта північного макросхилу. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу відрогу від крайових стежок поблизу с. Либохора. Це молодий, пристигаючий, буковий ліс із домішками явора, невеликою потужністю лісової підстилки, дуже великою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти – складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-5 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (5-9 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, вологий, із активною кореневою системою;

Ph – (9-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №14

Бучина ожиново-папоротева

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 133 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 1,0 см. Висота абсолютних відміток – 1100 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північно-східна. Ухил ділянки – 20°. Ділянка має стрімкий ухил, знаходиться на північно-східному схилі хребта північного макросхилу. До

ділянки можна дійти, якщо спуститись по схилу від урочища «Панська долина» через лісовий масив схилу або від крайових стежок поблизу с. Либохора. Це старовіковий чистий буковий ліс типу пралісового з невеликою потужністю лісової підстилки, значною кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти – складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-7 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (7-13 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, вологий, із активною кореневою системою;

Ph – (13-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, з активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №15

Бучина біднопокривна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 80 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 1,5 см. Висота абсолютних відміток – 1040 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північно-західна. Ухил ділянки – 4°. Ділянка вирівняна з мінімальним ухилом, знаходиться на терасовидній місцевості на північно-східному відрозі хребта північного макросхилу. До ділянки можна дійти туристичною стежкою від с. Либохора. Це старовіковий чистий буковий ліс із невеликою потужністю лісової підстилки, невеликою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-5 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком,

середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (5-10 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, вологий, з активною кореневою системою;

Ph – (10-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №16

Бучина біднопокривна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.) з домішками явора (*Ascer pseudoplatanus*). Вік – 200 років. Формула деревостану – 9Бк1Яв. Товщина підстилки – 2.0 см. Висота абсолютних відміток – 992 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-східна. Ухил ділянки – 20°. Ділянка зі стрімким ухилом схилу. Знаходиться на південно-східному схилі хребта південного макросхилу. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу по туристичній стежці від с. Буківець. Це старовіковий буковий ліс типу пралісового із значною потужністю лісової підстилки, малою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-6 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (6-10 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою;

Ph – (10-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №17

Бучина біднопокривна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 90 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 1.5 см. Висота абсолютних відміток – 1060 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 30°. Ділянка є приполонинною територією зі стрімким ухилом схилу. Знаходиться на південно-західному схилі хребта південного макросхилу. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу по історично-торговому шляху «Руська Путь» від с. Буківець. Це старовіковий буковий ліс із невеликою потужністю лісової підстилки, малою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-8 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (8-12 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою;

Ph – (12-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №18

Бучина різнотравно-ожинова

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.) з домішками явора (*Acer pseudoplatanus*). Вік – 80 років. Формула деревостану – 8Бк2Яв. Товщина підстилки – 1.5 см. Висота абсолютних відміток – 1010 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 25°. Ділянка з великим ухилом схилу. Знаходиться на південно-західному схилі хребта південного макросхилу. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу по історично-торговому шляху «Руська Путь» від с. Буківець. Це стиглий буковий ліс із невеликою потужністю лісової підстилки,

малою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-7 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (7-13 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою;

Рн – (13-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №19

Бучина біднопокровна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 60 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 1,5 см. Висота абсолютних відміток – 1060 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північно-західна. Ухил ділянки – 20°. Ділянка з великим ухилом схилу, знаходиться на схилі північно-східного відрогу хребта північного макросхилу. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу по історично-торговому шляху «Руська Путь» від с. Либохора. Це стиглий чистий буковий ліс із молодим підростом, невеликою потужністю лісової підстилки, значною кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-4 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, з розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (4-6 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, вологий, із активною кореневою системою;

Ph – (6-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №20

Бучина ожиново-папоротева

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 48 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 2,0 см. Висота абсолютних відміток – 1135 м.н.р.м. Експозиція схилу – північна. Ухил ділянки – 22°. Ділянка – приполонинна територія з великим ухилом схилу, знаходиться на схилі північно-східного відрогу хребта, північного макросхилу, поруч із вершиною г. Бегар. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу по туристичній стежці від с. Либохора. Це пристигаючий чистий буковий ліс із молодим підростом, великою потужністю лісової підстилки, малою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-5 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (5-12 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, вологий, із активною кореневою системою;

Ph – (12-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №21

Бучина ожиново-папоротева

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 48 років. Формула

деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 2,0 см. Висота абсолютних відміток – 1115 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північна. Ухил ділянки – 18°. Ділянка – середня межа лісу, територія з великим ухилом схилу, знаходиться на схилі північно-східного відрогу хребта, північного макросхилу, поруч із вершиною г. Бегар. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу по туристичній стежці від с. Либохора. Це пристигаючий чистий буковий ліс із молодим підростом, великою потужністю лісової підстилки, малою кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-3 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (3-11 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, вологий, з активною кореневою системою;

Ph – (11-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №22

Бучина різнотравно-ожинова

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 43 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 1,5 см. Висота абсолютних відміток – 1050 м.н.р.м. Екпозиція схилу – північно-східна. Ухил ділянки – 15°. Ділянка – середня межа лісу, територія з невеликим ухилом схилу, знаходиться на схилі північно-східного відрогу хребта, північного макросхилу, поруч із вершиною г. Журовка. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу по туристичній стежці від с. Либохора. Це пристигаючий чистий буковий ліс із молодим підростом, невеликою потужністю лісової підстилки, великою кількістю запасів грубих деревних залишків, перехідного горизонту ґрунтового профілю Нр візуально не виявлено, оскільки

ділянка була перезволожена після атмосферних опадів. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-8 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений з розгалуженою кореневою системою, вологий;

Ph – (8-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, вологий, активна коренева система.

Ділянка досліджень №23

Бучина біднопокривна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 90 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 2.5 см. Висота абсолютних відміток – 1110 м.н.р.м. Експозиція схилу – південно-східна. Ухил ділянки – 25°. Ділянка є приполювинною територією зі стрімким ухилом схилу. Знаходиться на південній улоговині схилу хребта, південного макросхилу. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу від туристичної стежки, яка бере початок від с Розтока. Це старовіковий буковий ліс із великою потужністю лісової підстилки, малою кількістю запасів грубих деревних залишків, перехідного горизонту ґрунтового профілю Нр візуально не виявлено, оскільки ділянка була перезволожена, після атмосферних опадів. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-5 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Ph – (5-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, вологий, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №24

Бучина біднопокровна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 90 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 2.5 см. Висота абсолютних відміток – 998 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 30°. Ділянка знаходиться біля підніжжя схилу, це територія із стрімким ухилом схилу. Знаходиться на південній улоговині схилу хребта, південного макросхилу. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу від немаркованої стежки, яка бере початок від с. Розтока. Це старовіковий буковий ліс із великою потужністю лісової підстилки, значною кількістю запасів грубих деревних залишків, перехідного горизонту ґрунтового профілю. Нр візуально не виявлено, оскільки ділянка була перезволожена після атмосферних опадів. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстилаються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-4 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Ph – (4-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, вологий, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №25

Бучина біднопокровна

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.). Вік – 170 років. Формула деревостану – 10Бк. Товщина підстилки – 2.5 см. Висота абсолютних відміток – 992 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 20°. Ділянка знаходиться біля підніжжя схилу, територія з великим ухилом схилу. Знаходиться на південнозахідному схилі хребта, південного макросхилу. До ділянки можна дійти через лісовий масив схилу від крайових стежок, поблизу с. Розтока. Це старовіковий буковий ліс типу пралісового із великою потужністю лісової підстилки, великою

кількістю запасів грубих деревних залишків. Перехідного горизонту ґрунтового профілю. Нр візуально не виявлено, оскільки ділянка була перезволожена після атмосферних опадів. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстиляються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-6 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Ph – (6-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, вологий, із активною кореневою системою.

Ділянка досліджень №26

Ялицева бучина папоротево-ожинова

Породи деревостану: бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.) з домішками явора (*Acer pseudoplatanus*) та ялиці карпатської (*Abies alba* L.). Вік – 180 років. Формула деревостану – 6Бк3Ял1Яв. Товщина підстилки – 1,0 см. Висота абсолютних відміток – 1000 м.н.р.м. Екпозиція схилу – південно-західна. Ухил ділянки – 23°. Ділянка зі стрімким ухилом схилу. Знаходиться біля г. Зелеменій. До ділянки можна дійти туристичною гірською стежкою з с. Щербовець. Це стиглий буковий ліс із малою потужністю лісової підстилки, значною кількістю запасів грубих деревних залишків. Ґрунти складені буроземами лісовими кислого рН, суглинисті, підстиляються карпатським флішем (материнська порода) елювіально-делювіального походження.

Ґрунтовий профіль:

Но – підстилка з гілок, плодів і листя бука;

Н – (0-5 см) гумусований горизонт, бурого кольору з темно-сірим відтінком, середньосуглинистий, грудкуватий, ущільнений, із розгалуженою кореневою системою, вологий;

Нр – (5-12 см) гумусований перехідний горизонт, світло-бурого кольору, середньосуглинистий, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою;

Ph – (12-30 см) перехідний у гірську породу, бурувато-палевого кольору, суглинистий, добре ущільнений, малого ступеня зволоження, із активною кореневою системою.

3.2 Методи досліджень

Відбір проб на території досліджень проводився з урахуванням трьох блоків лісових екосистем, а саме: лісова підстилка, грубі деревні залишки та ґрунт. Для цього на місцевості закладалися 26 ділянок досліджень із розмірами 10x10 м, площею 0,01 га (Vesterdal, Schmidt, 2008; Білоус, 2014; Рожак, 2014). Період відбору проб – травень-листопад 2023-2024 рр. Ділянки досліджень закладалися в лісах різного віку з переважанням домінуючого породного складу, на схилах різної крутизни та висоти над рівнем моря. Місця відбору проб знаходилися на відстані не менше 1-1,5 м від стовбурів дерев, що виступали на поверхню кореневих систем і повалених дерев чи великих гілок. Відбір проб на кожній ділянці проводився у 3-разовій повторюваності для лісової підстилки, ґрунту й обліку грубих деревних залишків (Пижик, Шпаківська, 2020).

Підстилка відбиралася на кожній дослідній ділянці у 3-разовій повторюваності. Для цього було використано дерев'яну рамку 25x25 см (Рожак, 2014; Vesterdal, Schmidt, 2008). Під час відбору проб місце перевірялося на відсутність зайвих компонентів, як-от: живої рослинності, мохів, великих гілок ($D > 1\text{ см}$) і крупних уламків гірської породи (Лелека, Шпаківська, Пижик, 2024). Лісову підстилку було просушено до повністю сухого стану, перебрано й відокремлено від неорганічних сполук (камінців), зелені рослин, мохів, лишайників, коріння. Після цього перебрану підстилку було просіяно через сито ($D = 1\text{ мм}$), задля відділення мінеральної частини ґрунту.

Для більш точного результату підстилку було розділено на компоненти в окремі тиглі. Відібрано такі компоненти: листя, плоди деревних порід, гілки ($D < 1\text{ см}$), детрит (максимально розкладена та подрібнена частина підстилки). Чисту підстилку спалюємо у фарфорових тиглях у муфельній печі (при температурі 450-500°C) протягом 8-10 годин за методом сухого озолення. Для того, щоб визначити вміст органічного Карбону в сухому субстраті підстилки після спалювання, було

використано коефіцієнт 0,45 (Лелека, Шпаківська, Пижик, 2024).

Для ґрунту відбір проб проводився в межах гумусового (Н), перехідного (Нр) та материнського (Ph) горизонтів. Місця проб завчасно були очищені від шару лісової підстилки. Під час камеральних досліджень ґрунт очищають від органічних частинок, фрагментів деревини і кореневищ за допомогою просіювання через сито розміром 1мм, додатково його перетирають у фарфоровій ступі за допомогою пестика з гумовим кінчиком. Інші дрібні частинки (напіврозкладене листя, гілки, щебенюваті уламки гірської породи) відділяються від проби за допомогою ебонітової палички.

Далі методом квартування було зроблено середню пробу масою близько 100 грамів із усього матеріалу, відібраного в полі. Вміст органічного Карбону визначається за допомогою методу Нікітіна (біхроматне окислення). Метод базується на окисленні органічної речовини біхроматом калію в сильно кислому середовищі сірчаної кислоти. Для окислення було використано 20% розчин $K_2Cr_2O_7$ у сульфатній кислоті (H_2SO_4) (Лелека, Шпаківська, Пижик, 2024).

З отриманої середньої проби було взято наважку від 0,15 до 0,3 грам для Н горизонту і від 0,3 до 0,5 грам для нижніх горизонтів. У склянку об'ємом 25-50 мл було висипано наважку ґрунту середньої проби й додано 10 мл хромової суміші. Отриману суміш перемішано склянкою паличкою й залишено на добу в сушильній шафі. Окрім цього, було підготовано контроль-розчин, хромову суміш без ґрунту, у яку додано 25 мл води. Потрібно було зачекати одну добу, а опісля – фотометрувати. Фотометричні виміри проводились при довжині хвилі 590 нм. фотометром КФК-3. Для перерахунку Карбону в гумус було використано коефіцієнт 1,724 (розраховано у відсотках). (Пижик та ін., 2022).

Під час проведення обліку запасів грубих деревних залишків () було використано метод фіксованої площі, розділений на два етапи. На першому етапі обліковувалися великі гілки ($D \geq 7$ см), сухостій (дерева, що зламані на висоті $\geq 1,3$ м) та пні. Другий етап проводився на ділянці розміром 3х3 м з облікуванням дрібних гілок ($D \geq 1-7$ см). Запаси обраховано методом зрізаного конуса.

Запас грубих деревних залишків було визначено за формулою зрізаного конуса:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2)$$

де h – висота зрізаного конуса (у нашому випадку довжина фрагмента), м, R , r – радіуси основ зрізаного конуса, м (Горошко, Портах, 2014).

Суть методу пояснюється вимірами довжини та діаметрів на протилежних сторонах досліджуваних фрагментів . (Morrissey et al., 2014; Russel et al., 2015). Для перерахунку було використано коефіцієнт 0.5 і середнє значення щільності мертвої деревини 0.345 т/м³ (Pyzhyk, Shpakivska, 2020).

На сьогодні статистичні методи й моделі є важливою частиною будь-яких досліджень, у тому числі й екологічних (Тарасова, 2008).

Слід відзначити, що біологічні (у тому числі й екологічні дані) є доволі складними для інтерпретації й потребують, окрім знання методів статистики, польових досліджень, що часто не відповідають закону нормального розподілу, рівності дисперсій. Це суттєво ускладнює їхній аналіз (Fieberg, 2024; Steel et al., 2013).

Статистичний аналіз отриманих даних проводили з використанням програм PAST v. 5.0.2, R v. 4.5.2 та MS Excel. Для опису вибірок визначали середнє арифметичне, стандартне відхилення та коефіцієнт варіації, а розподіл даних візуалізували за допомогою box plot. Відповідність даних нормальному розподілу перевіряли за критерієм Шапіро–Вілка.

У цій роботі для статистичного аналізу отриманих даних було використано такі програми: “PAST” v. 5.0.2 і “R” v. 4.5.2, онлайн-калькулятор <https://www.statkingdom.com/> і програми пакету MS Office, а саме MS Excel. Для підготовки окремих фрагментів коду мовою R, використаних для візуалізації результатів, застосовували ChatGPT (OpenAI, 2026). На першому етапі обробки даних було використано методи описової статистики – визначення середнього арифметичного, стандартного квадратичного відхилення, коефіцієнт варіації. На цьому етапі для аналізу даних були побудовані діаграми box plot, які дають краще розуміння розподілу даних (Fieberg, 2024; Steel et al., 2013; Fulk et al., 2023; Мармоза, 2013). На основі отриманих даних проводився попередній опис отриманих результатів.

Наступним кроком у дослідженнях є перевірка даних на відповідність закону нормального розподілу. Для перевірки використовувався тест Шапіро-Увілка (Fieberg, 2024; Steel et al., 2013; Fulk et al., 2023; Мармоза, 2013). Для цього застосовано такі інструменти: програму “PAST” v. 5.0.2 і “онлайн-калькулятор <https://www.statskingdom.com/>”. Залежно від результату цього тесту підбиралися методи порівняння вибірок (даних із північного і південного макросхилів Вододільно-Верховинського Хребта), методи кореляції та моделювання. Для даних, що відповідали нормальному розподілу, застосовувалися параметричні тести, а для тих, що не відповідали, – не параметричні (Zar, 2010; Crawley, 2014; Ghasemi, 2012).

Для порівняння двох незалежних вибірок, дані яких відповідали нормальному розподілу, використовували t-тест Велча, який не потребує припущення про рівність дисперсій. Додатково визначали стандартизований розмір ефекту (d) Коена. неоднорідність дисперсії (Derrick et al., 2016; Лабораторний практикум «Статистичний аналіз SPSS», 2020). Тут також визначений розмір стандартизованого ефекту (d) за Д. Коеном, що дає можливість краще зрозуміти та інтерпретувати отриманий результат. Для оцінки розміру ефекту використано таку шкалу: 0,0-0,2 – незначний; 0,2-0,5 – малий; 0,5-0,8 – середній, 0,8-1,0 – великий; $>1,0$ – дуже великий (Poldrack, 2019; Nakagawa, 2007). Порівняння проводилися в програмі PAST v. 5.0.2. Додатково було використано Байєс-фактор (BF_{10}). Це дало можливість порівняти розбіжності між двома групами на основі порівнянь H_0 і H_1 (Kass, 1995; Lee, 2012). Для інтерпретації BF_{10} використано шкалу Джеффріса (інтерпретація на користь H_1): 1 – дані підтримують обидві гіпотези, 1-3 – слабкі докази; 3-10 – помірні докази; 10-30 – сильні докази; >100 надзвичайно сильні докази (Kass, 1995; Lee, 2012).

Для порівняння вибірок, які не відповідають нормальному розподілу, використано тест Мана-Увітні (U-тест) (Гончар, 2021; Лабораторний практикум «Статистичний аналіз SPSS», 2020) в комбінації з коефіцієнтом Варга-Делані (A) і критерієм узгодженості Колмогорова-Смірнова (K-S) (Mangiafico, 2026; Reimann et al., 2000). Для оцінювання величини ефекту використовували коефіцієнт Vargha–Delaney (A): значення $A = 0,5$ відповідає відсутності переваги однієї групи над іншою, відхилення від 0,5 у напрямку 0 або 1 свідчить про зростання величини ефекту та

переважання відповідно однієї з порівнюваних груп (Mangiafico, 2026). Застосування такої комбінації тестів дає не просто можливість виявити чи є різниця між двома групами, але й простежити, яка саме група домінує і чи походять вони з одного розподілу, що підвищує якість інтерпретації даних (Mangiafico, 2026; Arcuri et al., 2011; Grissom et al., 2012).

Оцінка впливу факторів навколишнього середовища на об'єкт дослідження є важливим етапом будь-якого сучасного біологічного дослідження. Тут також стає в пригоді статистичний аналіз. Показник кореляції дозволяє оцінити, як буде змінюватись характеристика досліджуваного об'єкта під час зміни певного фактора. Залежно від відповідності даних до нормального розподілу, наявності повторень у даних, типу даних і поставлених завдань потрібно обирати різні типи кореляційного аналізу (Jain et al., 2011; Fieberg, 2024; Екологічна складова національної безпеки: основні показники і шляхи їх досягнення., 2013; Cohen, 1988; Портянник, 2025; McDonald, 2014; Ouachene, 2024). Для даних, що відповідають нормальному розподілу, обрано лінійну кореляцію Пірсона (r) (McDonald, 2014; Ouachene, 2024). Рангову кореляцію Спірмена (r_s) використано для набору даних, які не відповідають нормальному розподілу (Cohen, 1988; Портянник, 2025; McDonald, 2014; Ouachene, 2024). Також у дослідженні даних, де є багато повторень, був використаний показник рангової кореляції Тау Кендала (τ) (Ouachene, 2024). Кореляційний аналіз проводили як для сукупної вибірки дослідних ділянок, так і, за необхідності, окремо для північного та південного макросхилів, що дало змогу оцінити загальні закономірності та врахувати можливі відмінності між макросхилами (Тарасова, 2008; Jain, Ross, 2011; Sokal, Rohlf, 1995; Cohen, 1988; Портянник та ін., 2025; McDonald, 2014; Ouachene, 2024). Слід також відзначити, що під час проведення природничих досліджень деякі автори рекомендують брати до уваги як значимий коефіцієнт кореляції вище $\pm 0,3$. Статистично значущими вважали кореляційні зв'язки за $p < 0,05$. Для подальшої інтерпретації та моделювання враховували зв'язки з абсолютним значенням коефіцієнта кореляції $|r| \geq 0,3$, які розглядали як зв'язки щонайменше помірної сили. У цьому дослідженні оцінювався вплив віку деревостану, крутизни схилу, висоти над рівнем моря до запасів органічного Карбону в певному блоці. Також оцінено, чи

впливає запас $C_{\text{орг.}}$ в одному пулі на запаси в іншому.

Для тих випадків, коли виявлено статистично значимий коефіцієнт кореляції, який перевищував показник $\pm 0,3$, використовувалися різні методи статистичного моделювання. Це дозволило краще зрозуміти взаємозв'язки між змінними, а також оцінити, як змінюватиметься залежна змінна Y (у нас це запас $C_{\text{орг.}}$) від певної незалежної змінної X , якщо дані відповідали умовам лінійності зв'язку, нормальності й гомоскадестичності залишків (Zuur et al., 2010; Field, 2009; Портянник, 2024). Перевірку виконання цих умов проведено за допомогою програми PAST v.5.0.2. Для порівняння альтернативних моделей використовували скоригований інформаційний критерій Акаїке (AICс), який застосовували для вибірок малого обсягу ($n < 40$), а також коефіцієнт детермінації (R^2). Перевагу надавали моделі з найнижчим значенням AICс; значення R^2 використовували як додаткову характеристику частки варіації залежної змінної, поясненої моделлю. (Hammer et al., 2001; Masuda, 2026; Keith, 2016; Gelman, 2020). Якщо дві моделі мали однаковий коефіцієнт детермінації або навіть одна з них має вище значення R^2 , обиралася та модель, де значення AICс найнижче.

Для візуалізації та опису нелінійних залежностей між змінними використовували локально зважене згладжування LOESS. Метод застосовували у випадках, коли характер зв'язку не відповідав припущенню лінійності та використання лінійної регресійної моделі було недостатньо для опису структури даних. Параметр згладжування встановлювали на рівні 0,75 (Mangiafico, 2026). Ця модель не дає можливості отримувати рівняння регресії для всієї сукупності даних, але дозволяє краще оцінити особливості зміни певної залежної змінної під впливом певного фактора (незалежна змінна). Тут можна оцінити локальні особливості розподілу даних під впливом певного фактора (Leys et al., 2013; Jacoby, 2000; Keith et al., 2016).

Для візуалізації отриманих моделей використовувалися різні програми візуалізації – “PAST” v. 5.0.2 і “R” v. 4.5.2, також онлайн-калькулятор <https://www.statskingdom.com/>. Для написання коду в програмі “R”, також використано інструменти штучного інтелекту разом з даними із посібника

(Mangiafico, 2026). Моделі були побудовані з позначеннями 95% інтервалу достовірності, а також інтервалів прогнозування, що дає кращу можливість оцінити розподіл даних і визначити окремі аномальні значення. Це дозволяє правильно інтерпретувати дані.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТРАНСФОРМАЦІЇ ОРГАНІЧНОГО КАРБОНУ В ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ ВОДОДІЛЬНО-ВЕРХОВИНСЬКОГО ХРЕБТА

4.1. Статистична характеристика запасів Органічного Карбону блоку фітомаси в досліджуваних лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта.

Запаси органічного Карбону, акумульованого у фітомасі досліджуваних лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта, характеризувалися значною просторовою мінливістю. Порівняння ділянок, розташованих на північному та південному макросхилах хребта, виявило суттєві відмінності у величині цього пулу Карбону (табл. 4.1.1, рис. 4.1.1). На південному макросхилі запаси органічного Карбону у фітомасі були вищими порівняно з північним макросхилом. Відмінності між двома вибірками підтверджено результатами t-тесту для незалежних вибірок ($t = 4,87$; $p = 6,40 \times 10^{-5}$; $\alpha = 0,05$). Великий стандартизований розмір ефекту (d Коена = 1,95) свідчить не лише про статистичну значущість, а й про суттєву величину відмінностей між досліджуваними групами.

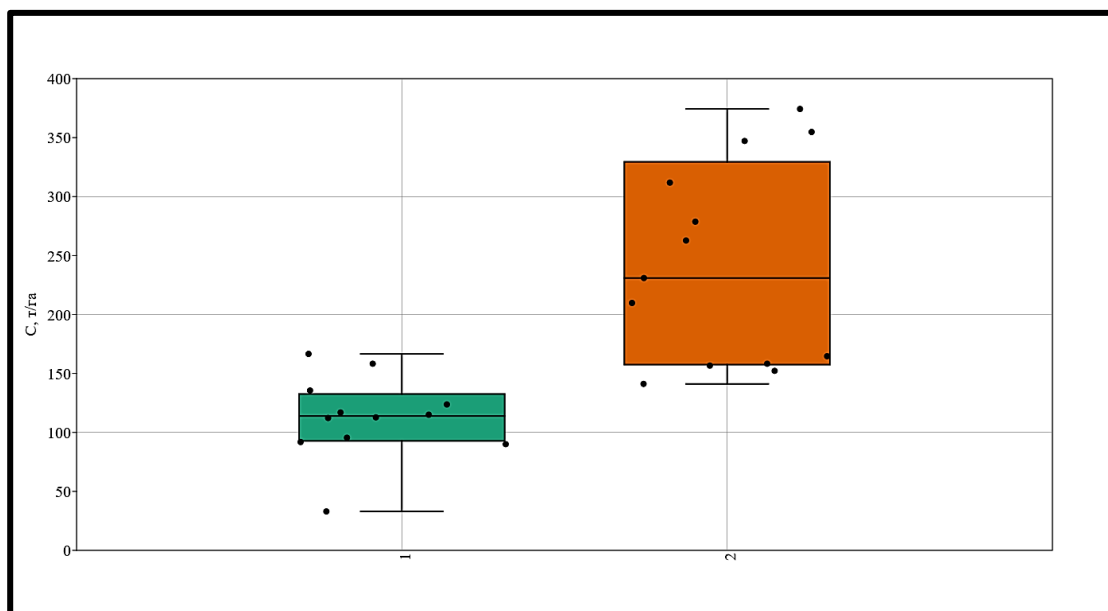


Рис. 4.1.1. Розподіл запасів органічного Карбону в блоці «фітомаси» в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта (1 – Пн. макросхил, 2 – Пд. макросхил)

Таблиця 4.1.1.

Порівняння запасів органічного Карбону в блоці «фітомаса» природних старовікових лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта

	Тест Шапіро-Уїлка ($\alpha=0,05$)	t-тест ($\alpha=0,05$)
Північний макросхил (Львівська обл)	W=0,93 p=0,39	t=4.87 p=6.40E-5
Південний макросхил (Закарпатська область)	W=0,89 p=0,11	Critical t=2,07 d =1,95

Великий стандартизований розмір ефекту (d Коена = 1,95) додатково свідчить про суттєві відмінності запасів органічного Карбону у фітомасі між досліджуваними групами лісових екосистем.

Виявлено сильний позитивний статистично значущий зв'язок між запасами органічного Карбону у фітомасі та віком деревостану ($r_s = 0,88$; $p = 7,60 \times 10^{-9}$). Для опису характеру цієї залежності побудовано експоненціальну модель (рис. 4.1.2).

Отримані результати свідчать про тенденцію до збільшення запасів органічного Карбону у фітомасі зі зростанням віку деревостану. За параметрами побудованої моделі середній річний приріст запасів становив 1,63%, однак межі 95% довірчого інтервалу для цього показника охоплювали нульове значення ($-0,50$ – $3,30\%$), тому оцінку темпу приросту слід трактувати з обережністю.

Оскільки вік деревостану суттєво відрізнявся між дослідними ділянками північного і південного макросхилів ($z = 3,60$; $p = 3,1 \times 10^{-4}$), він є важливим чинником, який необхідно враховувати під час інтерпретації відмінностей запасів органічного Карбону у фітомасі між цими групами. Значення показника Варга–Делані також свідчить про переважання вищих значень віку деревостанів у групі південного макросхилу.

Закономірний характер зв'язку між віком деревостану та запасами органічного Карбону у фітомасі пояснюється структурою цього пулу: основна його частка

припадає на стовбури, гілки та кореневі системи дерев, біомаса яких накопичується протягом тривалого періоду розвитку деревостану. Це узгоджується із сильним позитивним зв'язком між запасами органічного Карбону у фітомасі та об'ємом стовбурової фітомаси ($r_s = 0,80$).

Виявлено сильний статистично значущий зв'язок (при $\alpha=0,05$) між запасами органічного Карбону в блоці «фітомаса» від віку деревостану $r_s=0.88$. $p=7,60E-9$. Для опису цього зв'язку була побудована експоненціальна модель залежності $C_{орг.}$ у фітомасі від віку деревостану (рис. 4.1.2).

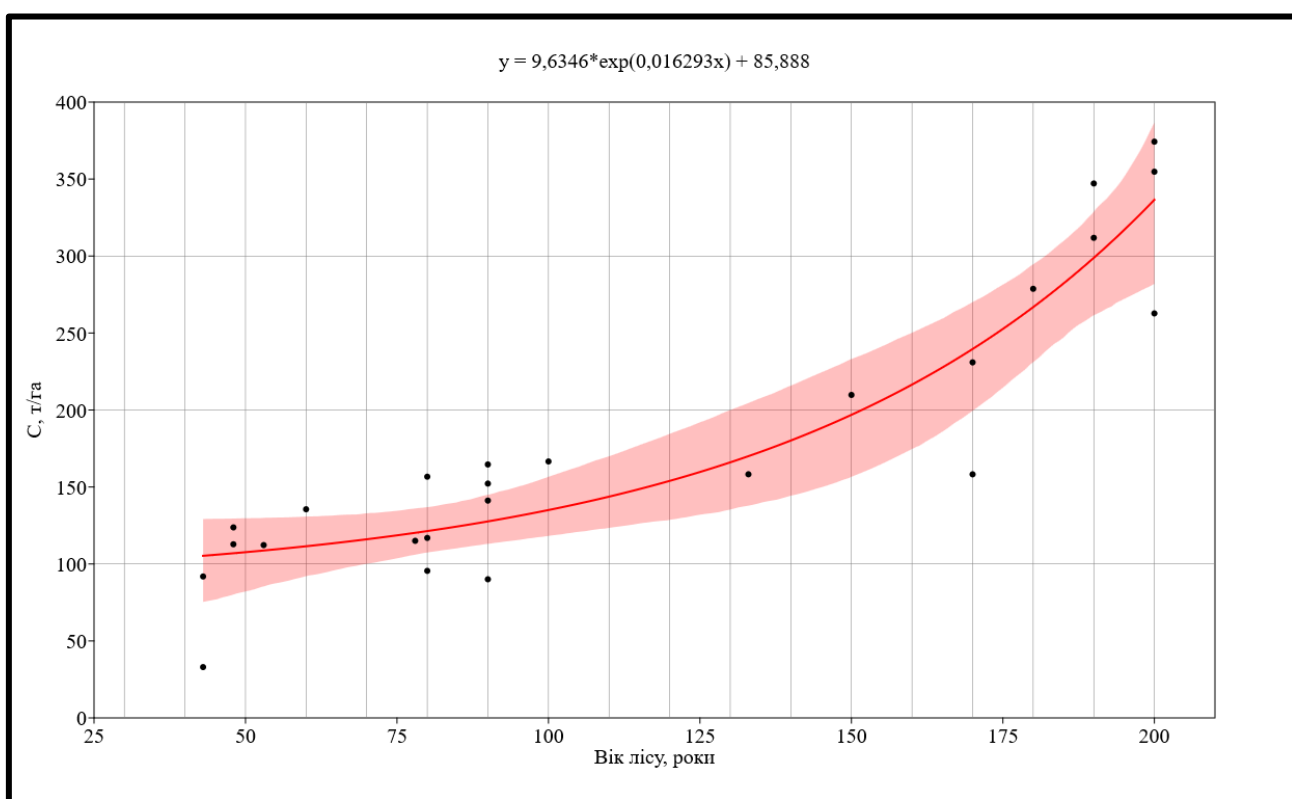


Рис. 4.1.2 Експоненціальна модель залежності запасів органічного Карбону в блоці «фітомаса» від віку деревостану в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта (рожева область 95% довірчий інтервал).

4.2 Характеристика запасів блоку грубих деревних залишків () і запасів Органічного Карбону в цьому блоці досліджуваних лісових екосистем Вододільно-Верховинського Хребта.

Дослідження запасів грубих деревних залишків та органічного карбону в їхньому складі проводилися на **26 постійних пробних ділянках**, що репрезентують старовікові та стиглі ліси Вододільно-Верховинського хребта. Такий обсяг вибірки дозволив отримати надійну оцінку як середніх значень показників, так і їхньої просторової та структурної варіабельності. Грубі деревні залишки () є важливим компонентом органічної речовини лісових екосистем і формуються внаслідок природного відмирання дерев та їхніх структурних частин. У старовікових лісах накопичення деревного детриту відбувається протягом тривалого часу та відображає природну динаміку деревостану.

Запаси грубих деревних залишків та органічного Карбону в їхньому складі визначали на 26 дослідних ділянках, що охоплювали стиглі та старовікові лісові екосистеми Вододільно-Верховинського хребта. Отримані дані характеризувалися значною просторовою варіабельністю, пов'язаною з віком, породним складом і структурними особливостями деревостанів (рис. 4.2.1).

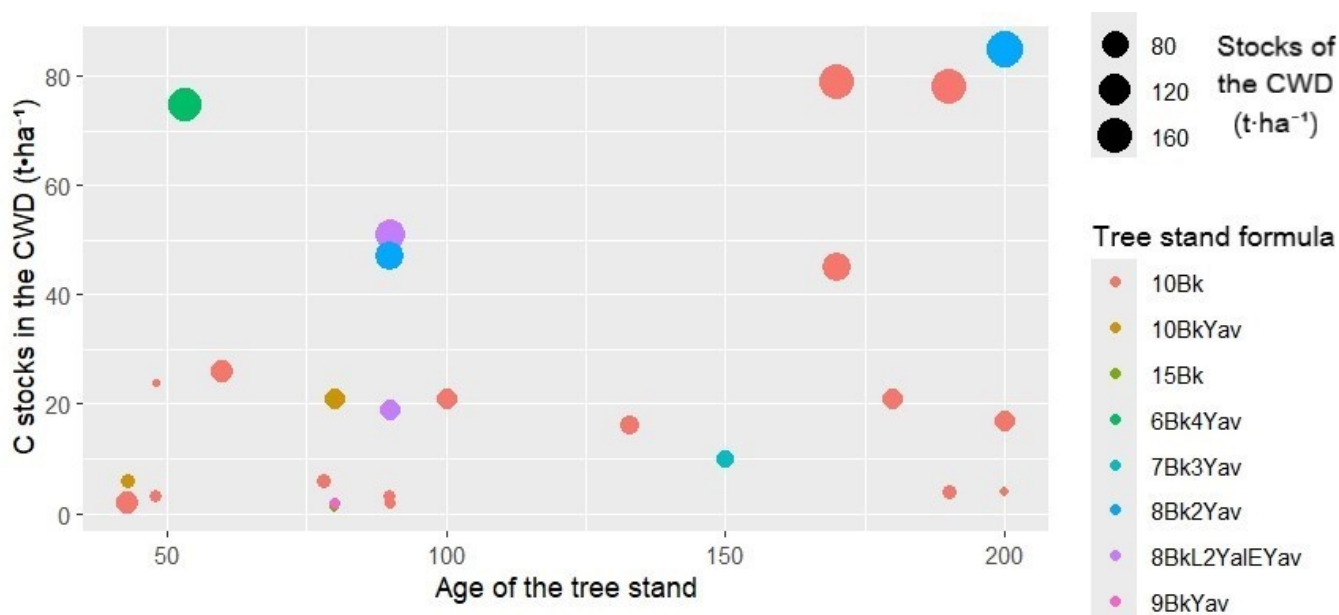


Рис. 4.2.1. Розподіл запасів органічного Карбону та органічної речовини в блоці грубих деревних залишків (ГДЗ)

Запаси грубих деревних залишків у досліджуваних лісових екосистемах характеризувалися значною варіабельністю й змінювалися від 1,71 до 171,21 т·га⁻¹. Середнє значення становило $52,02 \pm 54,96$ т·га⁻¹, тоді як медіана — 36,65 т·га⁻¹. Нижче

медіанне порівняно із середнім значення свідчить про асиметричний характер розподілу, зумовлений наявністю окремих ділянок із високими запасами деревного детриту (рис.4.2.1).

Найвищі значення запасів грубих деревних залишків зафіксовано на окремих ділянках старовікових лісів. Це може бути пов'язано з тривалим накопиченням деревного детриту внаслідок природного відмирання дерев та їхніх структурних частин. Мінімальні значення переважали на ділянках стиглих лісів, що свідчить про менший рівень акумуляції цього компонента..

Середній об'єм грубих деревних залишків по всіх ділянках досліджень становив $52,02 \pm 54,96 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Величина стандартного відхилення, яка перевищує половину середнього значення, вказує на дуже високий рівень варіабельності цього показника. Медіана запасів ГДЗ дорівнювала $36,65 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, що є істотно нижчим показником від середнього арифметичного значення й свідчить про асиметричний характер розподілу даних із наявністю окремих ділянок із надзвичайно високими запасами грубих деревних залишків, які зміщують середнє значення в бік більших величин.

Аналіз мінімальних і максимальних значень показав, що найвищі запаси грубих деревних залишків були зафіксовані на окремих ділянках старовікових лісів, де впродовж тривалого часу відбувалися природні процеси відмирання, вітровалів і накопичення деревного детриту без його систематичного вилучення. Натомість мінімальні значення запасів ГДЗ характерні переважно для стиглих лісових насаджень, де структура деревостану є більш спрощеною, а кількість відмерлої деревини обмежена внаслідок попереднього або поточного лісогосподарського використання (рис 4.2.1).

У старовікових лісах південного макросхилу середні запаси грубих деревних залишків становили $61,49 \pm 65,27 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ і змінювалися в широкому діапазоні — від 2,41 до $171,21 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Значна амплітуда коливань свідчить про високу просторову варіабельність запасів деревного детриту в межах цієї групи дослідних ділянок.

У стиглих лісах північного макросхилу середні запаси грубих деревних залишків були нижчими і становили $42,54 \pm 42,88 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, змінюючись від 1,71 до

151,68 т·га⁻¹. Для цієї групи також характерна значна варіабельність запасів деревного детриту, хоча середнє значення було нижчим порівняно зі старовіковими лісами південного макросхилу.

Таким чином, для обох груп дослідних лісових екосистем характерний широкий діапазон запасів грубих деревних залишків, що свідчить про мозаїчний характер їхнього накопичення. Вищі середні значення зафіксовано у старовікових лісах південного макросхилу, однак статистичну значущість відмінностей між групами оцінено окремо.

Перерахунок обсягів грубих деревних залишків у запаси органічного карбону дозволив кількісно оцінити внесок цього блоку в загальний баланс органічного Карбону лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта. Грубі деревні залишки формують один із найбільш контрастних за величиною та варіабельністю блоків Карбону.

За результатами досліджень встановлено, що по всій сукупності 26 дослідних ділянок запаси органічного карбону в грубих деревних залишках змінювалися в широких межах — від 0,86 до 85,6 т·га⁻¹. Такий значний діапазон значень свідчить про високу просторову неоднорідність цього пулу та відображає різний ступінь накопичення й розкладу деревного детриту в межах досліджуваної території (рис 4.2.1.). Середнє значення запасів органічного карбону в становило $26,12 \pm 27,38$ т·га⁻¹, при цьому величина стандартного відхилення перевищує половину середнього значення, що вказує на надзвичайно високий рівень варіабельності.

Медіана запасів органічного карбону в грубих деревних залишках дорівнювала 18,32 т·га⁻¹, що є істотно нижчим показником за середнє арифметичне значення. Така різниця між середнім і медіанним значеннями свідчить про асиметричний характер розподілу даних, зумовлений наявністю окремих ділянок із дуже високими запасами органічного карбону в . Саме ці ділянки формують «довгий хвіст» розподілу й суттєво впливають на величину середнього значення.

Таблиця 4.2.1.

**Запаси грубих деревних залишків та органічного Карбону в їхньому складі на
дослідних ділянках Вододільно-Верховинського хребта**

Макросхил	№ ділянки	Висота н.р.м. (м)	Ухил	Вік деревостану (р.)	Формула деревостану	Запаси ГДЗ (т·га ⁻¹)	Запаси С у ГДЗ (т·га ⁻¹)
Північний	1	1115	15°	43	10Бк+Яв	13.92	6.96
	2	1100	12°	80	10Бк+Яв	42.90	21.45
	3	890	4°	100	10Бк	42.42	21.21
	4	813	22°	90	8БкЛ2ЯлЕ+Яв	103.64	51.82
	5	822	19°	90	8БкЛ2ЯлЕ+Яв	38.92	19.46
	10	1022	9°	78	10Бк	12.87	6.44
	13	1060	2°	53	6Бк4Яв	151.68	75.84
	14	1100	20°	133	10Бк	33.98	16.99
	15	1040	4°	80	10Бк	2.94	1.47
	19	1060	20°	60	10Бк	52.75	26.37
	20	1135	22°	48	10Бк	7.06	3.53
	21	1115	18°	48	10Бк	1.71	0.86
	22	1050	15°	43	10Бк	48.24	24.12
Південний	6	1023	20°	190	10Бк	157.76	78.88
	7	1115	30°	170	10Бк	158.81	79.41
	8	1045	25°	190	10Бк	9.7	4.85
	9	1090	20°	200	7Бк3Яв	34.37	17.18
	11	1075	20°	200	8Бк2Яв	2.41	4.24
	12	848	30°	150	10Бк	20.38	10.19
	16	992	20°	200	9Бк+Яв	171.21	85.6
	17	1060	30°	90	10Бк	7.22	3.61
	18	1010	25°	80	8Бк2Яв	4.72	2.36
	23	1110	25°	90	10Бк	4.86	2.43
	24	998	30°	90	10Бк	95.15	47.57
	25	992	20°	170	10Бк	90.74	45.37
	26	1000	23°	180	6Бк3ЯлЕ+Яв	42.06	21.03

Аналіз мінімальних і максимальних значень показав, що найвищі запаси органічного карбону в грубих деревних залишках були зафіксовані на окремих ділянках старовікових лісів, де впродовж тривалого часу відбувалося безперервне накопичення деревного детриту різних стадій розкладу. Натомість мінімальні значення характерні переважно для стиглих насаджень або ділянок із порушеною структурою деревостану, де обсяг грубих деревних залишків є обмеженим (рис 4.2.1.).

У старовікових лісах південного макросхилу середні запаси органічного Карбону в грубих деревних залишках становили $30,98 \pm 32,41 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ і змінювалися від 2,36 до $85,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. У стиглих лісах північного макросхилу середнє значення було нижчим — $21,27 \pm 21,44 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, при діапазоні 0,86–75,84 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$. Для обох груп характерна значна варіабельність запасів Карбону в .

У стиглих лісах північного макросхилу запаси органічного карбону в грубих деревних залишках були нижчими та становили в середньому $21,27 \pm 21,44 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ при діапазоні значень 0,86–75,84 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$ (табл 4.2.1). Хоча окремі стиглі насадження також характеризувалися підвищеними запасами органічного карбону в , загалом для цієї групи ділянок була характерна менша частота екстремально високих значень і більш компактний розподіл показників порівняно зі старовіковими лісами.

Висока варіабельність запасів органічного карбону в грубих деревних залишках простежується як між різними типами лісу, так і в межах кожної окремої групи ділянок. Це чітко підтверджується співвідношенням середніх і медіанних значень, а також формою розподілу даних, що може бути наочно продемонстрована за допомогою box-plot діаграм. Така особливість свідчить про мозаїчний характер акумуляції деревного карбону, типовий для природних і напівприродних лісових екосистем гірських регіонів.

Статистичний аналіз органічного Карбону блоку грубих деревних залишків Вододільно-Верховинського Хребта

Запаси органічного Карбону в блоці грубих деревних залишків характеризувалися значною варіабельністю. Коефіцієнт варіації становив 95,65% для північного та 104,64% для південного макросхилу. За результатами тесту Шапіро–

Уїлка розподіл значень в обох вибірках статистично значуще відрізнявся від нормального ($p = 0,01$). Тому для порівняння запасів органічного Карбону між північним і південним макросхилами використано непараметричний U-тест Манна–Уїтні при $\alpha = 0,05$ (табл. 4.2.2).

За результатами U-тесту Манна–Уїтні статистично значущих відмінностей у запасах органічного Карбону в грубих деревних залишках між північним і південним макросхилами не виявлено ($z = 0,28$; $p = 0,78$). Низьке значення стандартизованого розміру ефекту ($r = 0,10$) також свідчить про незначні відмінності між досліджуваними групами. Значення показника Варга–Делані ($A = 0,46$) не вказує на виражене переважання значень однієї з вибірок.

Таблиця 4.2.2.

**Порівняння запасів органічного Карбону в блоці ГДЗ природних
старовікових лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта**

	Тест Шапіро-Уїлка ($\alpha=0,05$)	U-тест ($\alpha=0,05$)	Тест Колмогорова-Смірнова для 2 вибірок (K-S) ($\alpha=0,05$)
Північний макросхил (Львівська обл)	W=0,81 p=0,01	z=0,28 p=0,78 r=0,10 A=0,46	D=0,23 p=0,83 Critical D=0.533
Південний макросхил (Закарпатська область)	W=0,81 p=0,01		

Результати двовибіркового тесту Колмогорова–Смірнова також не виявили статистично значущих відмінностей між розподілами запасів органічного Карбону на північному та південному макросхилах ($D = 0,23$; $p = 0,83$).

Отже, запаси органічного Карбону в блоці грубих деревних залишків характеризуються насамперед високою внутрішньогруповою варіабельністю, тоді як статистично значущої диференціації між макросхилами не встановлено. Для всієї

сукупності дослідних ділянок середнє значення запасів органічного Карбону в цьому блоці становило $26,12 \pm 27,38 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

4.3 Характеристика запасів блоку підстилки та запасів Карбону в цьому блоці досліджуваних лісових екосистем Вододільно-Верховинського Хребта.

Лісова підстилка є динамічним компонентом лісової екосистеми, що забезпечує надходження органічної речовини до ґрунту та бере участь у процесах її трансформації й мінералізації. Вона формується переважно з опадів листя, хвої, дрібних гілок та інших рослинних решток і є важливим поверхневим пулом органічного Карбону.

Запаси лісової підстилки та органічного Карбону в її складі визначали на 26 дослідних ділянках, що репрезентували стиглі та старовікові лісові екосистеми Вододільно-Верховинського хребта. Отримані дані дали змогу оцінити просторову варіабельність цього пулу та особливості його формування в різних умовах досліджуваних лісових екосистем (рис.4.3.1).

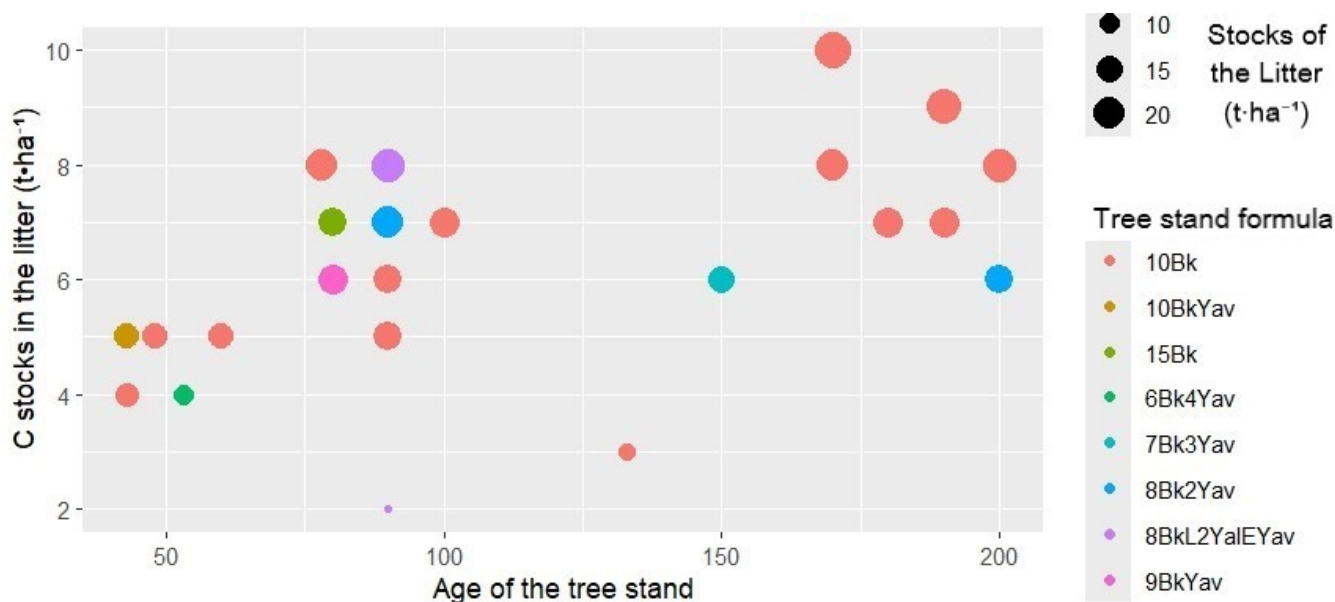


Рис.4.3.1. Розподіл запасів лісової підстилки та органічного Карбону в її складі на дослідних ділянках Вододільно-Верховинського хребта.

Запаси лісової підстилки на 26 дослідних ділянках змінювалися від 6,89 до 24,85 т·га⁻¹. Середнє значення становило $16,45 \pm 4,39$ т·га⁻¹, а медіана — 16,84 т·га⁻¹. Близькі значення середнього та медіани свідчать про відносно симетричний характер розподілу цього показника.

У старовікових лісах південного макросхилу запаси підстилки змінювалися від 15,10 до 24,85 т·га⁻¹ і становили в середньому $19,04 \pm 2,88$ т·га⁻¹. У стиглих лісах північного макросхилу вони були нижчими — $13,85 \pm 4,15$ т·га⁻¹ при діапазоні 6,89–21,03 т·га⁻¹. Таким чином, старовікові ліси південного макросхилу характеризувалися вищими середніми запасами підстилки та меншою варіабельністю цього показника.

Найменший запас лісової підстилки — 6,89 т·га⁻¹ — зафіксовано на дослідній ділянці № 4 через три роки після суцільної рубки 2020 року. Це свідчить про істотне зменшення поверхневого пулу органічної речовини після порушення деревостану та зміни режиму надходження рослинних решток. Отриманий результат узгоджується з даними попередніх досліджень цієї ділянки (Лелека, Шпаківська, Пижик, 2024).

Варто зазначити, що навіть на рівні загальної характеристики запасів лісової підстилки чітко простежується тенденція до їхнього збільшення у старовікових насадженнях порівняно зі стиглими лісами (Рис 4.3.1). Ця тенденція проявляється як у вищих середніх значеннях, так і в більш стабільному характері варіації запасів підстилки, що є важливим передумовним чинником для подальшого аналізу вмісту органічного карбону та його ролі в загальному балансі Карбону лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта.

Запаси органічного Карбону в лісовій підстилці є інтегральним показником, який поєднує кількісні характеристики підстилки (її масу) та якісні властивості органічної речовини (вміст органічного карбону). Саме тому цей показник є більш інформативним для оцінки ролі підстилки в загальному балансі карбону лісових екосистем, ніж окремий аналіз маси підстилки або концентрації Corg. У межах лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта підстилка формує поверхневий, відносно швидкообмінний блок органічного Карбону, чутливий до просторових і структурних відмінностей деревостанів.

Запаси органічного Карбону в лісовій підстилці на 26 дослідних ділянках змінювалися від 2,85 до 10,59 т·га⁻¹. Середнє значення становило $6,75 \pm 1,82$ т·га⁻¹, а медіана — 6,91 т·га⁻¹. Близькі значення середнього та медіани свідчать про відносно симетричний характер розподілу цього показника.

У старовікових лісах південного макросхилу середні запаси органічного Карбону в підстилці становили $7,72 \pm 0,88$ т·га⁻¹ і змінювалися в межах 6,13–10,59 т·га⁻¹. У стиглих лісах північного макросхилу середнє значення було нижчим — $5,79 \pm 1,78$ т·га⁻¹ при діапазоні 2,85–8,85 т·га⁻¹. Для старовікових лісів південного макросхилу також була характерна менша варіабельність запасів органічного Карбону в підстилці.

Найменший запас органічного Карбону в лісовій підстилці — $2,85 \pm 0,53$ т·га⁻¹ — зафіксовано на дослідній ділянці № 4 через три роки після суцільної рубки 2020 року. Зменшення запасу органічного Карбону на цій ділянці відображає зміну поверхневого пулу органічної речовини після порушення деревостану. Отримані результати узгоджуються з даними попередніх досліджень цієї ділянки (Лелека, Шпаківська, Пижик, 2024).

Слід зазначити, що запаси органічного карбону в лісовій підстилці чітко відображають як вікову структуру насаджень, так і просторову диференціацію лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта (Рис 4.3.1). Старовікові ліси характеризуються вищими та більш стабільними запасами органічного карбону в підстилці, тоді як у стиглих лісах спостерігається зменшення середніх значень і зростання варіабельності цього показника. Отримані закономірності підкреслюють важливу роль лісової підстилки як чутливого індикатора змін у функціонуванні лісових екосистем і створюють основу для подальшого аналізу взаємозв'язку між підстилкою, грубими деревними залишками та ґрунтовим пулом органічного карбону.

Таблиця 4.3.1

Запаси підстилки та запаси органічного Карбону у блоці підстилки

Макросхил	№ ділянки	Висота н.р.м. (м)	Ухил	Вік деревостану (р.)	Формула деревостану	Запаси підстилки (т·га ⁻¹)	Corg. %	Запаси С у підстилці (т·га ⁻¹)
Північний	1	1115	15°	43	10Бк+Яв	13.28	42.44	5.64
	2	1100	12°	80	10Бк+Яв	14.70	41.05	6.01
	3	890	4°	100	10Бк	17.63	40.56	7.13
	4	813	22°	90	8Бк12ЯлЕ+Яв	6.89	41.36	2.85
	5	822	19°	90	8Бк12ЯлЕ+Яв	21.03	42.08	8.85
	10	1022	9°	78	10Бк	19.81	43.37	8.59
	13	1060	2°	53	6Бк4Яв	10.25	40.28	4.13
	14	1100	20°	133	10Бк	8.44	42.73	3.61
	15	1040	4°	80	15Бк	16.70	42.11	7.05
	19	1060	20°	60	10Бк	13.12	40.96	5.37
	20	1135	22°	48	10Бк	13.69	42.83	5.86
	21	1115	18°	48	10Бк	12.45	41.79	5.21
	22	1050	9°	43	10Бк	12.04	40.67	4.92
Південний	6	1023	17°	190	10Бк	18.38	41.8	7.7
	7	1115	21°	170	10Бк	24.85	42.67	10.59
	8	1045	20°	190	10Бк	23.58	40.08	9.42
	9	1090	17°	200	7Бк3Яв	21.05	41.03	8.63
	11	1075	11°	200	8Бк2Яв	19.77	40.88	8.13
	12	848	30°	150	10Бк	15.1	40.72	6.13
	16	992	24°	200	9Бк+Яв	16.38	39.99	6.55
	17	1060	21°	90	10Бк	16.99	41.46	5.94
	18	1010	16°	80	8Бк2Яв	17.05	39.88	6.83
	23	1110	25°	90	10Бк	16.14	41.58	6.73
	24	998	22°	90	10Бк	19.71	39.81	7.89
	25	992	21°	170	10Бк	19.75	41.46	8.14
	26	1000	23°	180	6Бк3ЯлЕ+Яв	18.8	40.25	7.68

Вміст органічного карбону в лісовій підстилці

Вміст органічного Карбону (Corg) у лісовій підстилці на 26 дослідних ділянках змінювався в межах 37,63–43,60%, а середнє значення становило $41,32 \pm 1,46\%$. Порівняно невеликий діапазон значень свідчить про меншу варіабельність вмісту органічного Карбону порівняно із запасами підстилки та запасами Карбону в цьому блоці.

Відмінності у вмісті Corg між окремими дослідними ділянками можуть бути пов'язані зі ступенем трансформації органічних решток та особливостями складу лісової підстилки.

Варто зазначити, що вміст органічного Карбону у підстилці тримається у відносно вузьких межах — **37,63–43,60%**, тоді як маса самої підстилки змінюється значно істотніше. Отже, різницю в запасах Карбону в цьому блоці значною мірою визначає саме **маса накопиченої підстилки**.

Статистичний аналіз органічного Карбону блоку підстилки Вододільно-Верховинського Хребта

За результатами тесту Шапіро–Уїлка розподіл запасів органічного Карбону в підстилці в обох досліджуваних групах статистично значуще не відрізнявся від нормального ($p = 0,87$ для північного та $p = 0,59$ для південного макросхилу). Тому для порівняння середніх значень використано t-тест Стюдента для незалежних вибірок (табл. 4.3.2).

Таблиця 4.3.2

Порівняння запасів органічного Карбону в природних старовікових лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта

	Тест Шапіро-Уїлка ($\alpha=0,05$)	t-тест ($\alpha=0,05$)
Північний макросхил (Львівська обл)	W=0,97 p=0,87	t=3,14 p=0,004
Південний макросхил (Закарпатська область)	W=0,95 p=0,59	Critical t=2,06 Cohens D=1,23

За результатами t-тесту встановлено статистично значущі відмінності запасів органічного Карбону в лісовій підстилці між досліджуваними групами ($t = 3,14$; $p = 0,004$). Великий стандартизований розмір ефекту (d Коена = 1,23) свідчить про суттєву величину цих відмінностей. Вищі запаси органічного Карбону в підстилці характерні для старовікових лісів південного макросхилу (рис. 4.3.2).

Виявлено залежність запасів органічного Карбону в лісовій підстилці від віку деревостану. Коефіцієнт лінійної кореляції Пірсона (при $\alpha=0,05$) становить $r = 0,54$; $p = 0,004$ і $R^2 = 0,2919$ (середній позитивний статистично значимий зв'язок).

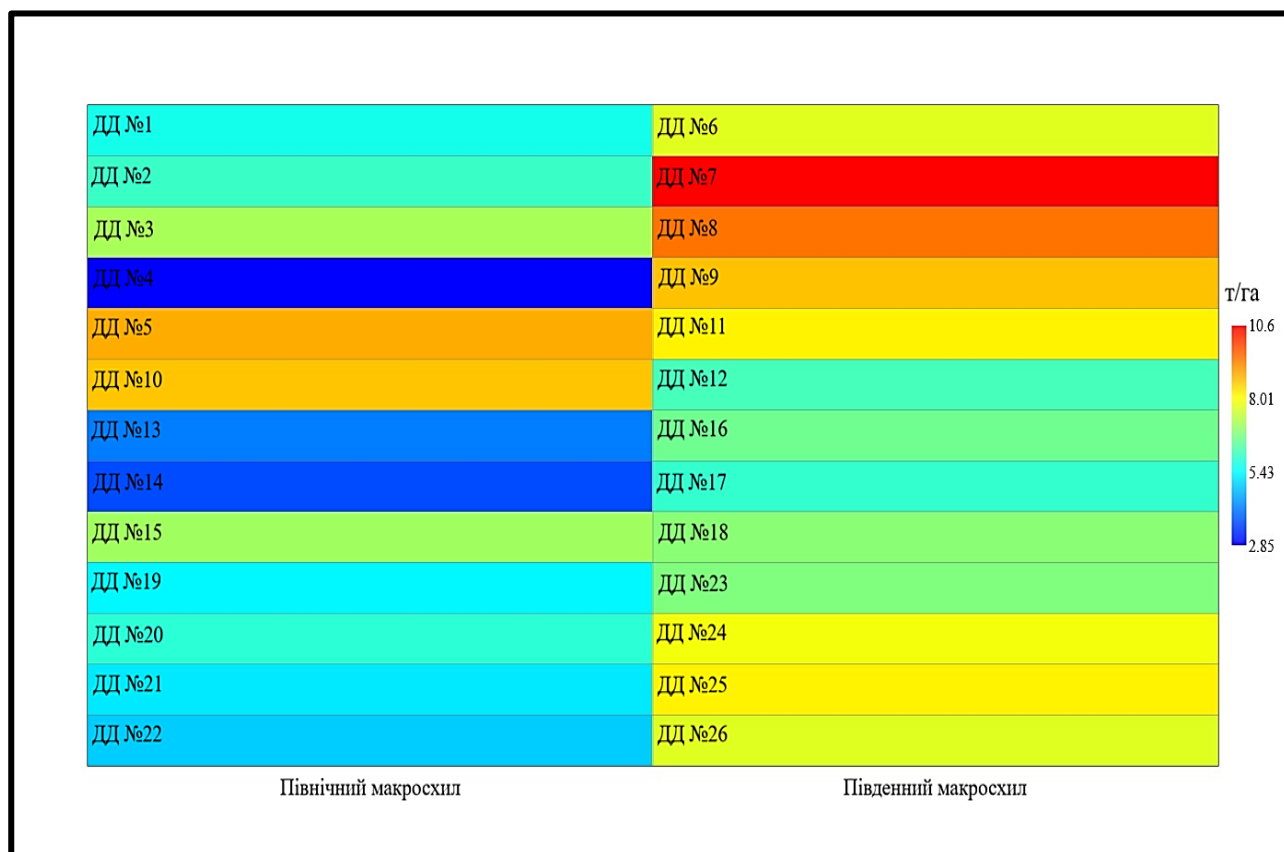


Рис.4.3.2 Порівняння запасів органічного Карбону в природних старовікових лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта

Виявлено середній позитивний статистично значущий зв'язок між запасами органічного Карбону в лісовій підстилці та віком деревостану ($r = 0,54$; $p = 0,004$).

За результатами простої лінійної регресії встановлено, що вік деревостану пояснює близько 29% варіації запасів органічного Карбону в лісовій підстилці ($R^2 = 0,2919$; $p = 0,004$) (рис. 4.3.3).

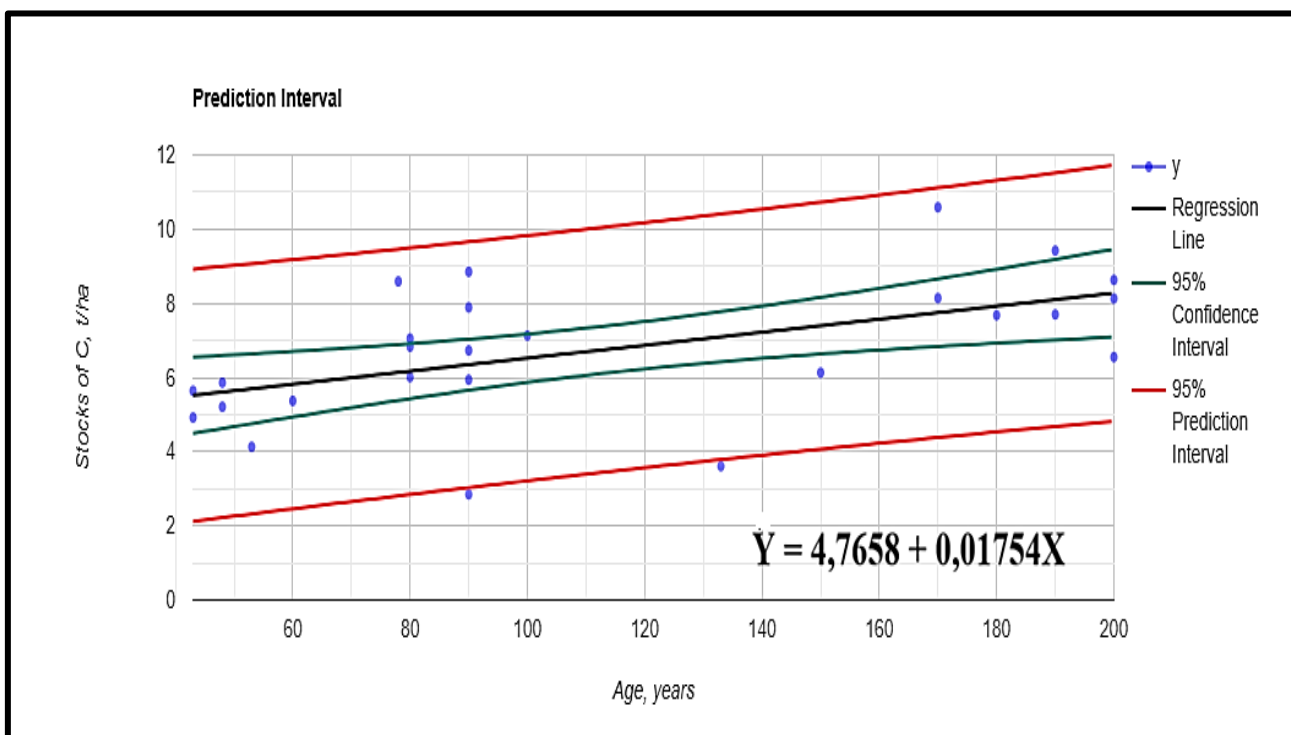


Рис.4.3.3. Графік лінійної регресії залежності запасів органічного Карбону в блоці «лісова підстилка» від віку деревостану в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта.

За параметрами лінійної моделі збільшення віку деревостану на один рік відповідало би збільшенню запасів органічного Карбону в підстилці приблизно на $20 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$.

Отже, результати дослідження запасів органічної речовини та органічного карбону в лісовій підстилці на 26 дослідних ділянках Вододільно-Верховинського хребта свідчать про істотні відмінності між старовіковими та стиглими лісами як за абсолютними значеннями, так і за варіабельністю показників. Старовікові ліси південного макросхилу характеризуються вищими середніми запасами органічного карбону в підстилці, а також більшою просторовою неоднорідністю цього пулу, що відображає складність і природну динаміку їхнього функціонування.

4.4 Характеристика запасів блоку ґрунту та запасів Органічного Карбону в цьому блоці досліджуваних лісових екосистем Вододільно-Верховинського Хребта.

Ґрунт є важливим і відносно стабільним пулом органічного Карбону в лісових екосистемах та забезпечує його довготривале депонування. У межах досліджуваних лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта оцінювання ґрунтового пулу проводили за вмістом органічної речовини та запасами органічного Карбону у верхньому 0–30-сантиметровому шарі ґрунту.

Дослідження проведено на 26 пробних ділянках. Зразки відбирали з ґрунтових горизонтів у межах шару 0–30 см, що дало змогу оцінити профільний і просторовий розподіл органічного Карбону та його сумарні запаси в досліджуваних ґрунтах (рис. 4.4.1.).

Відбір проб ґрунту відбувався у верхньому активному шарі 0-30 см. У процесі досліджень виділено три горизонти досліджуваного шару: Н – горизонт верхній активний гумусований шар ґрунту; Нр – середній, перехідний шар ґрунту; Ph – нижній шар ґрунту, який характеризується меншим гумусованим шаром і більшою мінеральною частиною (материнський шар гірської породи, зазвичай суглинного складу).

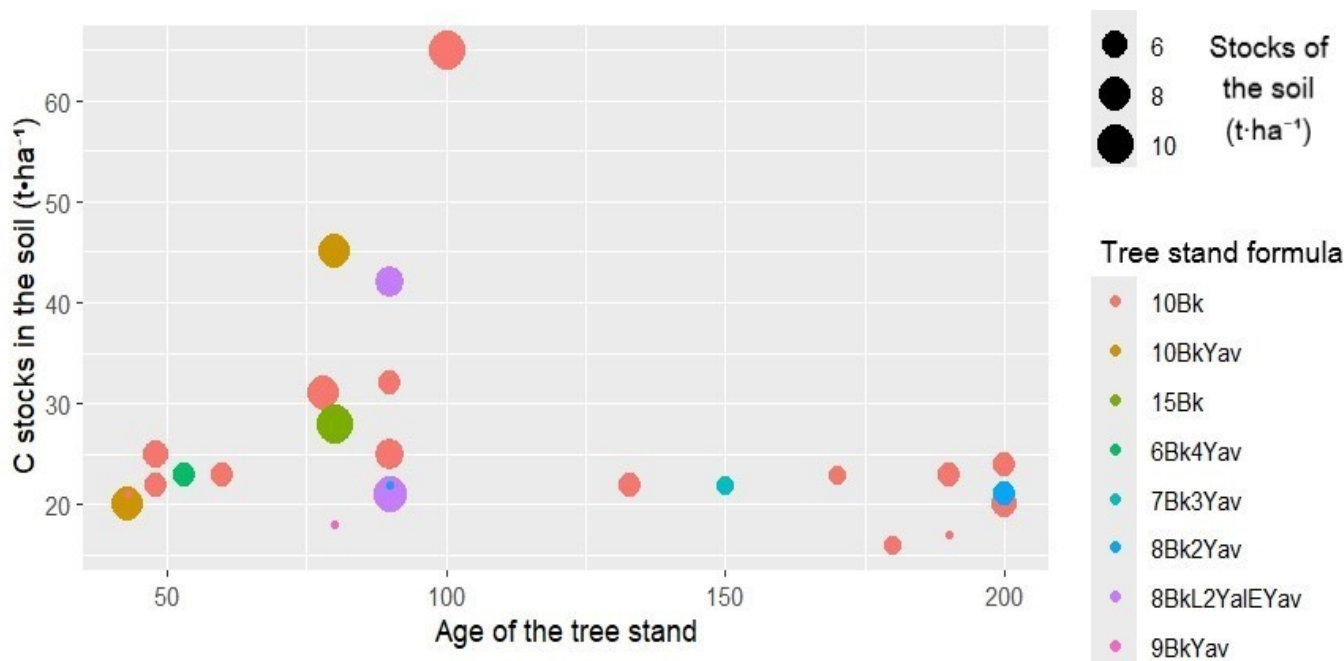


Рис.4.4.1. Розподіл запасів органічного Карбону та гумусу в ґрунтах досліджуваних лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта

Запаси органічного Карбону у верхньому ґрунтовому горизонті на 26 дослідних ділянках змінювалися від 3,36 до 10,79 т·га⁻¹. Середнє значення становило $6,08 \pm 2,09$ т·га⁻¹, а медіана — 5,45 т·га⁻¹. Відмінності між середнім і медіанним значеннями свідчать про певну асиметрію розподілу та просторову неоднорідність акумуляції органічного Карбону (табл.4.4.1.)

На північному макросхилі середні запаси органічного Карбону становили $7,36 \pm 2,30$ т·га⁻¹ і змінювалися від 3,36 до 10,79 т·га⁻¹. На південному макросхилі діапазон значень був вужчим — 3,41–7,80 т·га⁻¹.

Варіабельність запасів органічного Карбону у верхньому ґрунтовому горизонті може бути пов'язана з просторовою неоднорідністю ґрунтових умов та морфометричними характеристиками схилів. Особливості розподілу сумарних запасів органічного Карбону в шарі ґрунту 0–30 см розглянуто нижче.

Сумарні запаси органічного Карбону в ґрунті визначали шляхом інтегрування його запасів в окремих ґрунтових горизонтах у межах шару 0–30 см. На 26 дослідних ділянках значення цього показника змінювалися від 20,22 до 65,86 т·га⁻¹. Середній запас органічного Карбону становив $33,93 \pm 9,36$ т·га⁻¹, а медіана — 31,89 т·га⁻¹, що свідчить про значну міжділянкову варіабельність ґрунтового пулу Карбону.

У старовікових лісах південного макросхилу середні сумарні запаси органічного Карбону в шарі ґрунту 0–30 см становили $30,81 \pm 4,76$ т·га⁻¹ і змінювалися від 24,68 до 42,71 т·га⁻¹. У стиглих лісах північного макросхилу середнє значення було вищим — $37,06 \pm 11,78$ т·га⁻¹ при діапазоні 20,22–65,86 т·га⁻¹. Для північного макросхилу була характерна також більша варіабельність цього показника.

Отримані результати свідчать про значну просторову неоднорідність запасів органічного Карбону в ґрунті. Вищі середні значення зафіксовано у стиглих лісах північного макросхилу, однак статистичну значущість відмінностей між досліджуваними групами оцінено окремо.

Аналіз розподілу значень сумарних запасів органічного карбону показав, що більшість дослідних ділянок характеризуються концентрацією значень у середньому діапазоні, водночас окремі ділянки формують крайні мінімальні та максимальні

значення. Це свідчить про мозаїчний характер акумуляції ґрунтового органічного карбону, типовий для гірських лісових ландшафтів.

При порівнянні сумарних запасів органічного карбону в ґрунтах залежно від типу лісу та сторін макросхилу було встановлено чіткі відмінності між старовіковими лісами південного макросхилу та старовіковими лісами північного макросхилу. У старовікових лісах південного макросхилу середні запаси ґрунтового органічного карбону були нижчими і становили $30,81 \pm 4,76 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, змінюючись у межах 24,68–42,71 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$. Для старовікових лісів північного макросхилу отримано вищі значення цього показника — у середньому $37,06 \pm 11,78 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ при діапазоні 20,22–65,86 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$ (табл.4.4.1).

Аналізуючи отримані показники, ми помітили, що навіть у межах одного типу лісу простежувалася суттєва внутрішня неоднорідність сумарних запасів органічного карбону у ґрунті. Водночас інтеграція запасів до глибини 0–30 см дозволяє оцінити загальний потенціал ґрунтів щодо довготривалого депонування органічного карбону незалежно від варіацій у потужності окремих горизонтів.

Сумарні запаси органічного карбону в ґрунтах лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта демонструють значну міжділянкову варіабельність і чітко виражені відмінності між старовіковими та стиглими лісами. Ґрунти старовікових лісів південного макросхилу характеризуються нижчими середніми запасами органічного карбону та меншою просторовою неоднорідністю. Це підкреслює їхню унікальність, яка залежить від групи абіотичних і біотичних чинників, як-от: вікових характеристик деревостану, його породного складу, кліматичних умов і ухилів ділянок досліджень. Натомість північний макросхил з його більш молодим породним складом та більшою антропогенною навантаженістю показав вищі значення. Причиною цього є менші ухили ділянок досліджень, а це призводить до збільшення потужності верхніх ґрунтових горизонтів, меншого площинного змиву, що покращує депонувальні спроможності ґрунтового покриву.

Таблиця 4.4.1.

**Запаси органічного Карбону в блоці ґрунт досліджуваних лісових екосистем
Вододільно-Верховинського хребта**

Макросхил	№ д.д.	Висота н.р.м. (м)	Ухил	Вік деревостану (роки)	Формула деревостану	Вміст органічного Карбону, %	Запаси С у ґрунті (т·га ⁻¹)
Північний	1	1115	15°	43	10Бк+Яв	8.75	20.22
	2	1100	12°	80	10Бк+Яв	8.34	45.07
	3	890	4°	100	10Бк	10.79	65.86
	4	813	22°	90	8БкЛ2ЯлЕ+Яв	9.96	21.68
	5	822	19°	90	8БкЛ2ЯлЕ+Яв	7.75	42.70
	10	1022	9°	78	10Бк	8.48	45.70
	13	1060	2°	53	6Бк4Яв	5.26	34.59
	14	1100	20°	133	10Бк	5.50	33.47
	15	1040	4°	80	10Бк	10.26	41.86
	19	1060	20°	60	10Бк	5.17	30.72
	20	1135	22°	48	10Бк	6.13	36.80
	21	1115	18°	48	10Бк	5.96	32.29
	22	1050	15°	43	10Бк	3.36	30.76
Південний	6	1023	20°	190	10Бк	5.00	34.3
	7	1115	30°	170	10Бк	4.15	34.43
	8	1045	25°	190	10Бк	3.95	26.15
	9	1090	20°	200	7Бк3Яв	6.07	30.14
	11	1075	20°	200	8Бк2Яв	5.84	31.49
	12	848	30°	150	10Бк	4.38	29.68
	16	992	20°	200	9Бк+Яв	5.41	28.05
	17	1060	30°	90	10Бк	7.8	32.81
	18	1010	25°	80	8Бк2Яв	3.41	24.68
	23	1110	25°	90	10Бк	5.12	42.71
	24	998	30°	90	10Бк	3.91	29.96
	25	992	20°	170	10Бк	3.96	30.88
	26	1000	23°	180	6Бк3ЯлЕ+Яв	4.88	25.2

Статистичний аналіз органічного Карбону блоку ґрунту Вододільно-Верховинського Хребта

За результатами тесту Шапіро–Уїлка розподіл сумарних запасів органічного Карбону в ґрунті в обох досліджуваних групах статистично значуще не відрізнявся від нормального ($p = 0,26$ для північного та $p = 0,20$ для південного макросхилу). Тому для порівняння середніх значень використано t-тест Стюдента для незалежних вибірок (табл. 4.4.2).

За результатами t-тесту статистично значущих відмінностей у сумарних запасах органічного Карбону в шарі ґрунту 0–30 см між північним і південним макросхилами не встановлено ($t = 1,77$; $p = 0,09$). Водночас стандартизований розмір ефекту був помірним (d Коена = 0,69), що вказує на наявність певної різниці між середніми значеннями досліджуваних груп, яка за наявного обсягу вибірки не досягла рівня статистичної значущості.

Таким чином, попри вищі середні запаси органічного Карбону в ґрунтах стиглих лісів північного макросхилу, статистично підтвердженої диференціації ґрунтового пулу Карбону між досліджуваними групами не виявлено (рис. 4.4.2).

Таблиця 4.4.2.

Порівняння запасів органічного Карбону в блоці ґрунт у природних старовікових лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта

	Тест Шапіро-Уїлка ($\alpha=0,05$)	t-тест ($\alpha=0,05$)
Північний макросхил (Львівська обл)	$W=0,92$ $p=0,26$	$t=1,77$ $p=0,09$
Південний макросхил (Закарпатська область)	$W=0,91$ $p=0,20$	Critical $t=2,07$ Cohens $D=0,69$

Не було виявлено статистично значущої різниці між даними запасів органічного Карбону, отриманих на північному і південному макросхилах Вододільно-Верховинського Хребта (табл. 4.4.2, Рис. 4.4.2).

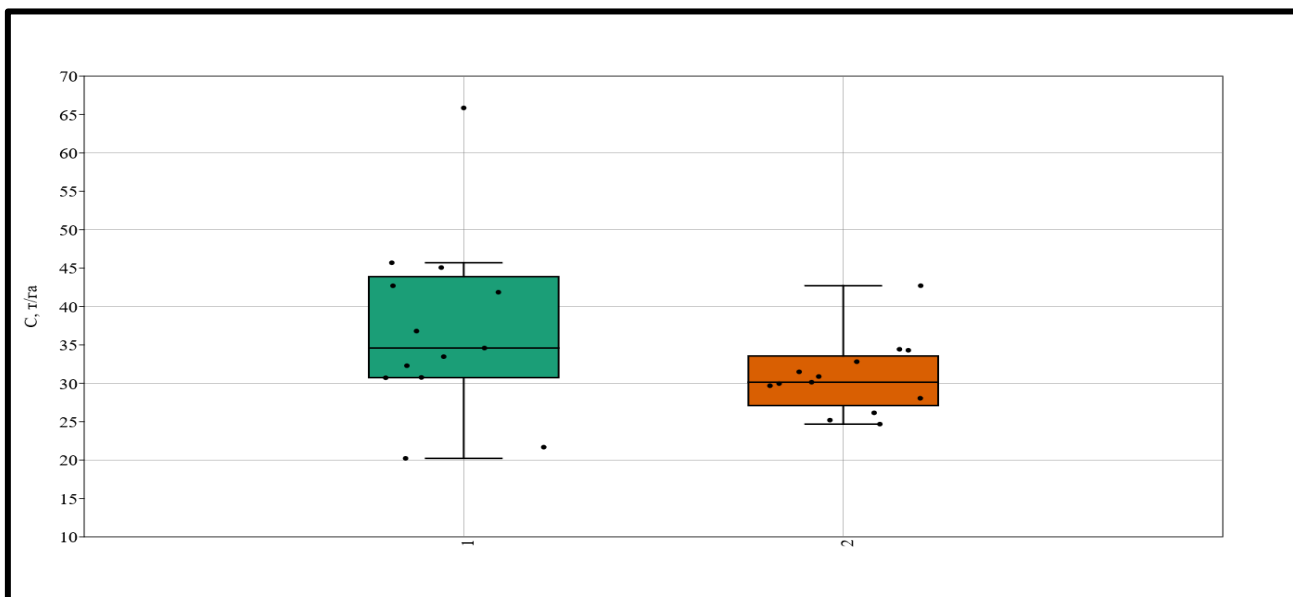


Рис. 4.4.2. Порівняння запасів $C_{\text{орг}}$ на різних макросхилах Вододільно-Верховинського Хребта (1 – Пн. макросхил, 2 – Пд. макросхил)

Розмір стандартизованого ефекту (D) вказує на середню різницю між окремими даними з обох вибірок.

Використавши коефіцієнт рангової кореляції Кендалла (τ), ми визначили слабкий негативний зв'язок між крутизною схилів і запасами $C_{\text{орг}}$ (рис. 4.4.3).

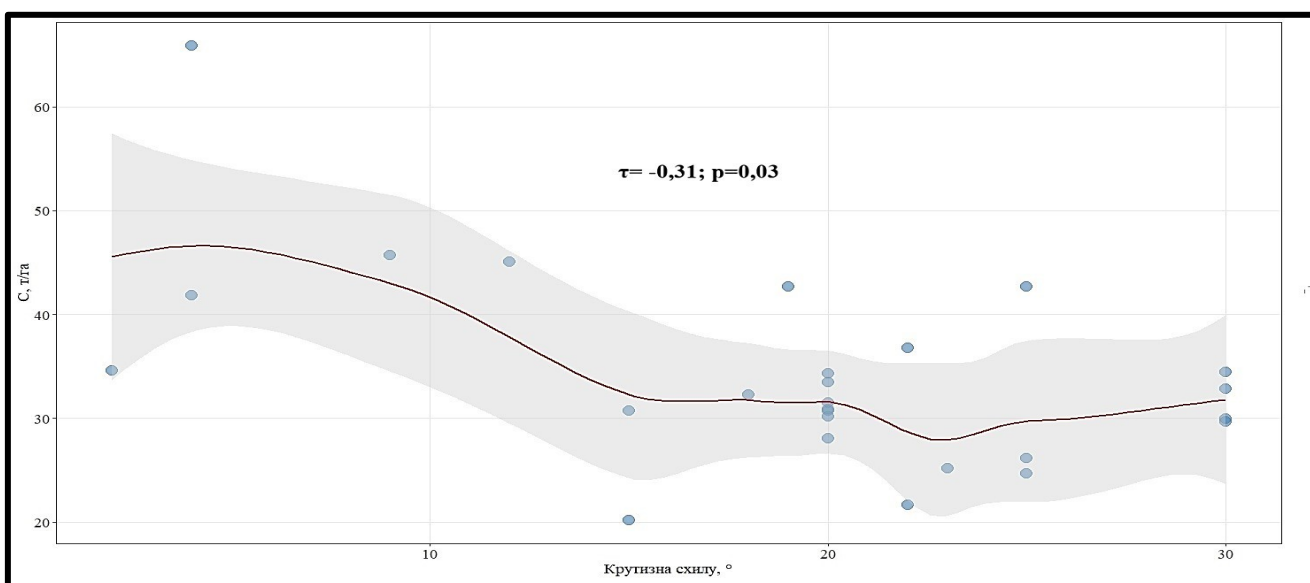


Рис. 4.4.3. Оцінка впливу крутизни схилу на вміст органічної речовини в ґрунті: лінія тренду LOESS та межі 95% довірчого інтервалу (сіра область).

Використання згладжування LOESS дозволяє краще описати особливості зміни запасів органічного Карбону під впливом крутизни схилу та охопити у 95% довірчого інтервалу максимальну кількість даних в порівнянні з лінійною чи експотенціальною кривою кореляції. Отримана кореляція пов'язана з тим, що із зростанням крутизни схилу буде зростати й інтенсивність ерозійних процесів, що на пряму впливатиме на запаси $C_{\text{орг.}}$ у ґрунті (FAO, 2019). Дещо вирівняний кінець має лінія тренду LOESS, який має висхідний характер. Це можна пояснити впливом факторів, які для цих ділянок будуть мати сильніший вплив, ніж градієнт крутизни (Wu et al., 2017).

4.5. Загальна характеристика запасів Органічного Карбону та запасів органіки в досліджуваних лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта.

Сумарні запаси органічного Карбону в досліджуваних лісових екосистемах визначали як суму його запасів у чотирьох основних пулах: живій фітомасі, лісовій підстилці, грубих деревних залишках та ґрунті. На 26 дослідних ділянках сумарні запаси органічного Карбону змінювалися від 65,83 до 468,01 т·га⁻¹, а середнє значення для всієї вибірки становило 232,36 т·га⁻¹.

У старовікових лісах південного макросхилу середні сумарні запаси органічного Карбону становили 303,10 т·га⁻¹, тоді як у стиглих лісах північного макросхилу — 161,43 т·га⁻¹. Таким чином, середні сумарні запаси Карбону в старовікових лісах південного макросхилу були майже вдвічі вищими.

Відмінності у сумарних запасах органічного Карбону між дослідними ділянками формувалися внаслідок неоднакового внеску окремих пулів. Найбільшу частку сумарного запасу становила жива фітомаса, тоді як внесок лісової підстилки, грубих деревних залишків і ґрунту був меншим та характеризувався різною просторовою варіабельністю

Статистичний аналіз сумарних запасів органічного Карбону Вододільно-Верховинського Хребта

За результатами тесту Шапіро–Уїлка розподіл сумарних запасів органічного Карбону в обох досліджуваних групах статистично значуще не відрізнявся від нормального ($p = 0,27$ для північного та $p = 0,75$ для південного макросхилу). Тому для порівняння середніх значень використано t-тест Стьюдента для незалежних вибірок (табл. 4.5.1).

Встановлено статистично значущі відмінності сумарних запасів органічного Карбону між досліджуваними групами ($t = 4,83$; $p = 6,39 \times 10^{-5}$). Великий стандартизований розмір ефекту (d Коена = 1,85) свідчить про суттєву величину цих відмінностей. Сумарні запаси органічного Карбону були вищими у старовікових лісах південного макросхилу порівняно зі стиглими лісами північного макросхилу (рис. 4.5.1).

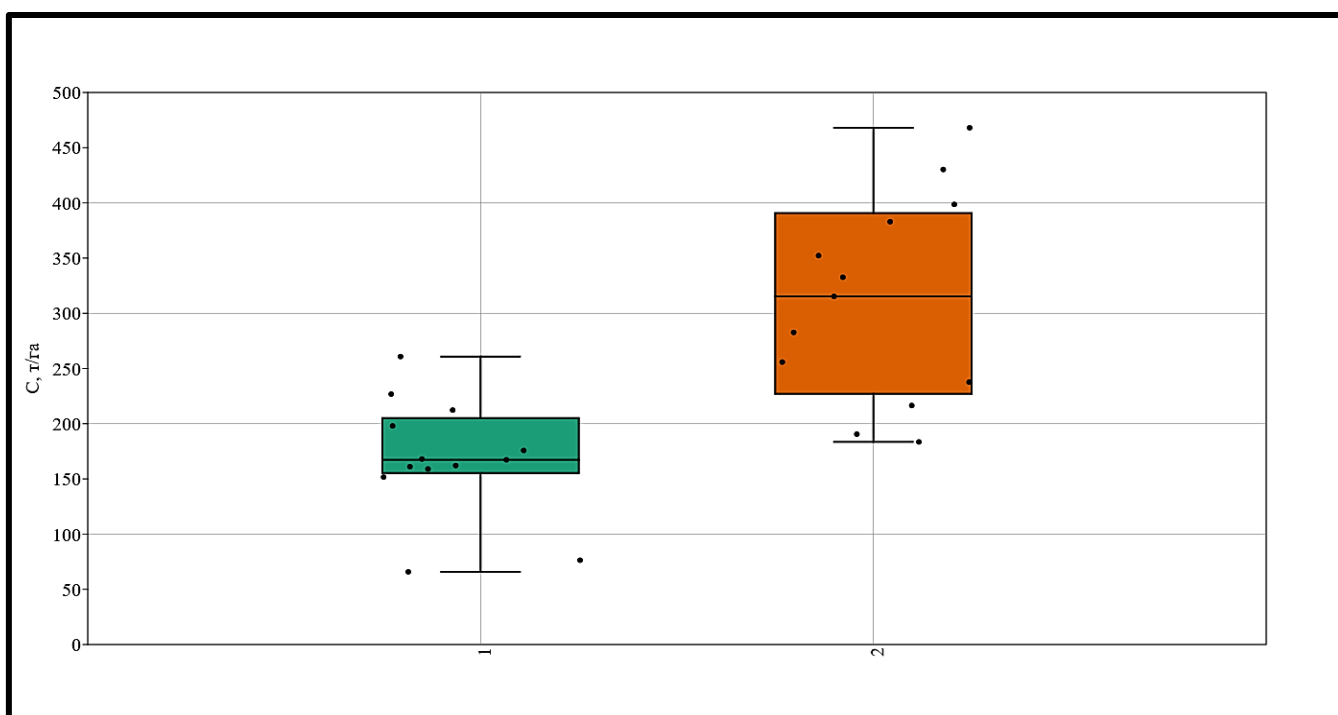


Рис. 4.5.1 Розподіл сумарних запасів органічного Карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта (1 – Пн. макросхил, 2 – Пд. макросхил)

Таблиця 4.5.1

**Порівняння сумарних запасів органічного Карбону в лісових екосистемах
Вододільно-Верховинського Хребта**

	Тест Шапіро-Уїлка ($\alpha=0,05$)	t-тест ($\alpha=0,05$)
Північний макросхил (Львівська обл)	W=0,92 p=0,27	t=4.83 p=6,39E-5
Південний макросхил (Закарпатська область)	W=0,96 p=0,75	Critical t=2,06 d=1,85 BF ₁₀ =301

Виявлено сильний позитивний статистично значущий зв'язок між сумарними запасами органічного Карбону та віком деревостану ($r = 0,88$; $p = 2,00 \times 10^{-9}$). За результатами простої лінійної регресії вік деревостану пояснював близько 78% варіації сумарних запасів органічного Карбону ($R^2 = 0,78$) (рис. 4.5.2).

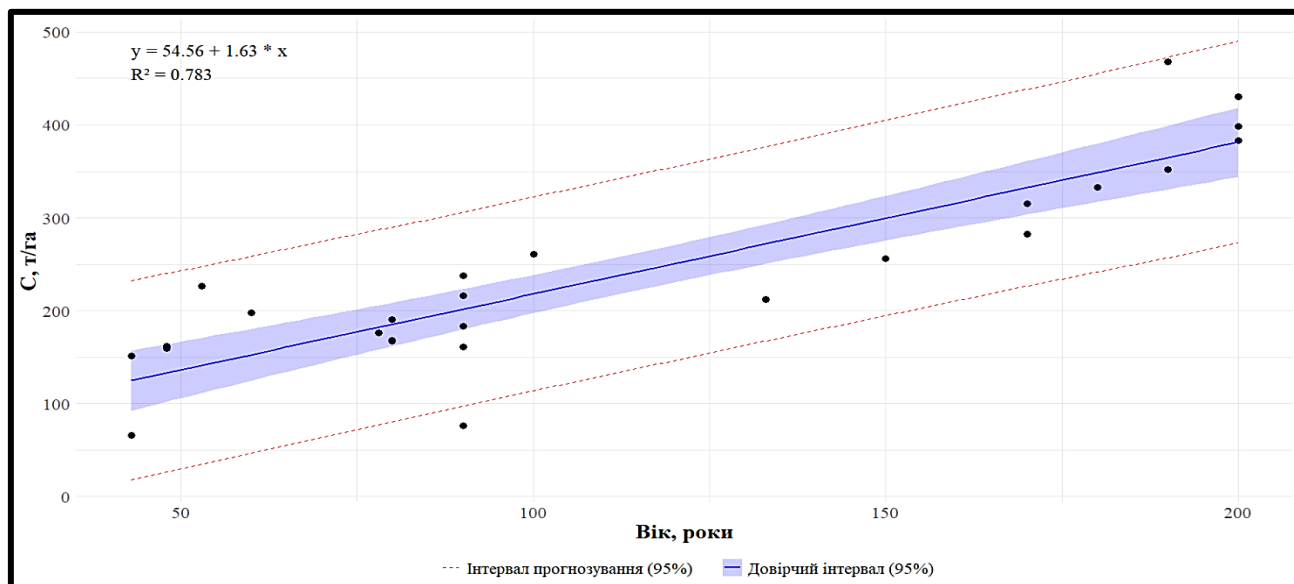


Рис. 4.5.2 Лінійна модель залежності сумарних запасів органічного Карбону від віку деревостану в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського Хребта.

Висока залежність сумарних запасів органічного Карбону від віку деревостану значною мірою пов'язана зі структурою загального пулу, в якому домінує Карбон живої фітомаси (табл.4.5.2).

Таблиця 4.5.2

Загальні запаси органічного карбону (т/га⁻¹) у компонентах лісових екосистем Вододільно-Верховинського Хребта

Макросхил	№дд.	Запаси С у живій фітомасі (т·га ⁻¹)	запаси С у підстиліці (т·га ⁻¹)	Запаси С у ГДЗ (т·га ⁻¹)	Запаси С у ґрунті (т·га ⁻¹)	Сумарні запаси С (т·га ⁻¹)
Північний	1	33.01	5.64	6.96	20.22	65.83
	2	95.51	6.01	21.45	45.07	168.04
	3	166.58	7.13	21.21	65.86	260.78
	4	0.00	2.85	51.82	21.68	76.35
	5	90.06	8.85	19.46	42.70	161.07
	10	115.03	8.59	6.44	45.70	175.76
	13	112.25	4.13	75.84	34.59	226.81
	14	158.26	3.61	16.99	33.47	212.33
	15	116.92	7.05	1.47	41.86	167.30
	19	135.53	5.37	26.37	30.72	197.99
	20	112.79	5.86	3.53	36.80	158.98
	21	123.74	5.21	0.86	32.29	162.10
	22	91.88	4.92	24.12	30.76	151.68
Південний	6	347.13	7.7	78.88	34.3	468.01
	7	158.23	10.59	79.41	34.43	282.66
	8	311.84	9.42	4.85	26.15	352.26
	9	374.29	8.63	17.18	30.14	430.24
	11	354.77	8.13	4.24	31.49	398.63
	12	209.79	6.13	10.19	29.68	255.79
	16	262.74	6.55	85.6	28.05	382.94
	17	141.15	5.94	3.61	32.81	183.51
	18	156.69	6.83	2.36	24.68	190.56
	23	164.62	6.73	2.43	42.71	216.49
	24	152.22	7.89	47.57	29.96	237.64
	25	230.93	8.14	45.37	30.88	315.32
	26	278.73	7.68	21.03	25.2	332.64

Особливо наочно це проявляється на дослідній ділянці № 4, розташованій на зрубі, де відсутність живої деревної фітомаси зумовлює істотно нижчий сумарний запас органічного Карбону порівняно з лісовими ділянками

Між сумарними запасами органічного Карбону та його запасами у фітомасі встановлено сильний позитивний зв'язок ($r = 0,93$; $p = 4,85 \times 10^{-12}$), а із запасами Карбону в лісовій підстилці — позитивний зв'язок середньої сили ($r = 0,54$; $p = 0,004$). Оскільки запаси Карбону в окремих пулах є складовими сумарного показника, ці залежності відображають насамперед внесок відповідних пулів у формування загального запасу органічного Карбону. Для ґрунту та грубих деревних залишків статистично значущих зв'язків із сумарним запасом Карбону не встановлено.

Структура сумарних запасів органічного Карбону в досліджуваних лісових екосистемах характеризувалася домінуванням пулу живої фітомаси, на який припадало близько 72% загального запасу. Частка ґрунтового пулу становила близько 14%, грубих деревних залишків — 11%, а лісової підстилки — 3% (рис. 4.5.3).

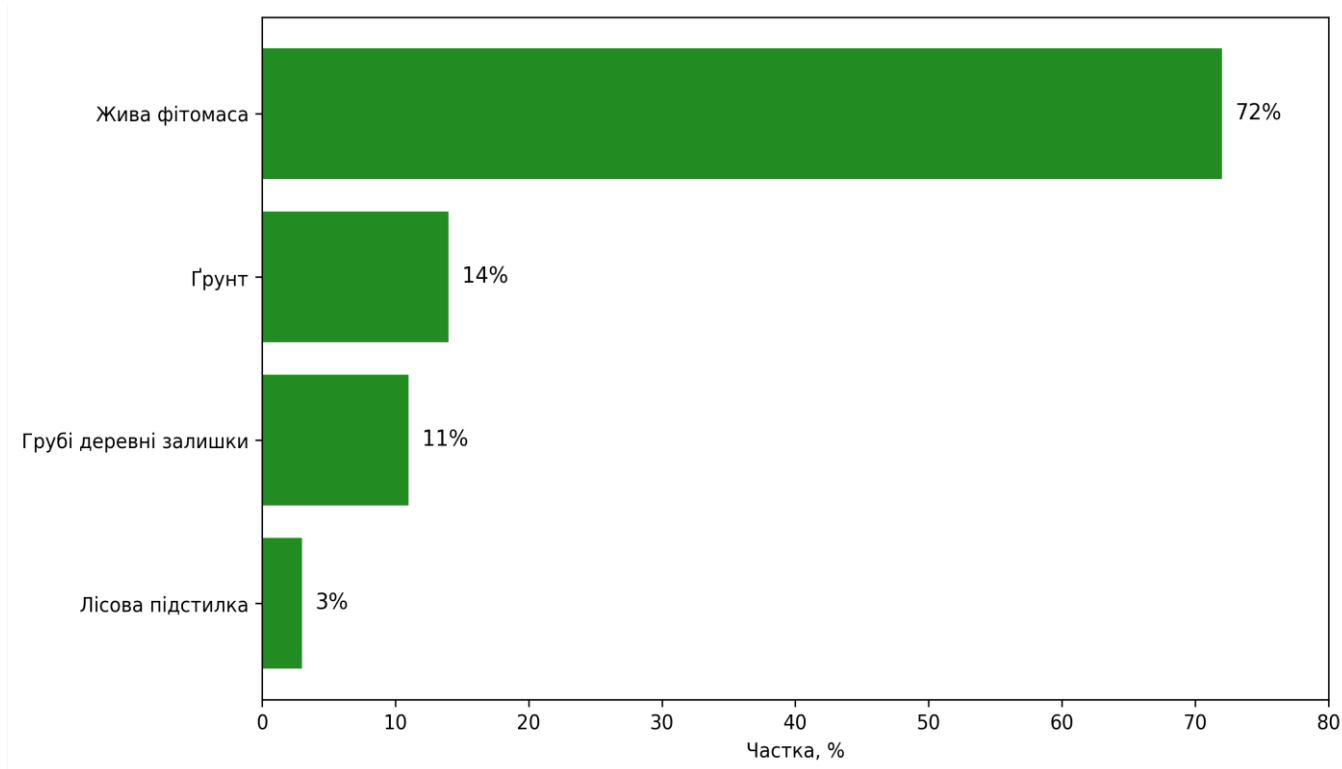


Рис. 4.5.3. Частки кожного блоку (%) лісових екосистем в загальному балансі запасів органічного Карбону т·га⁻¹.

Таким чином, відмінності сумарних запасів органічного Карбону між досліджуваними лісовими екосистемами визначалися насамперед запасами Карбону у живій фітомасі. Водночас ґрунт, грубі деревні залишки та лісова підстилка формували менші, але функціонально відмінні пули Карбону, просторову мінливість яких визначали різні екологічні чинники.

4.6. Ґрунтова мезофауна як біотичний чинник трансформації органічної речовини

Дослідження ґрунтової мезофауни проведено з метою оцінювання ролі біотичної складової у трансформації органічної речовини в основних типах старовікових лісів Вододільно-Верховинського хребта. Проаналізовано таксономічне різноманіття, кількісні показники угруповань – чисельність і масу, їхню трофічну структуру та показники добового метаболізму (Q , Дж·м⁻²·добу⁻¹).

Ключова ділянка 1. Дослідження проведено у природному старовіковому смереково-буковому яличнику вологої смереково-ялицевої бучини. Рослинна асоціація – смереково-буковий яличник біднопокривний (*Piceeto-Fageto-Abietum sparsaeherbosum*), вік деревостану – 110 років на північному макросхилі

Збір та облік ґрунтової мезофауни здійснювали методом пошарового викопування ґрунтових проб до глибини поширення безхребетних із подальшим ручним розбором. Розмір проб становив 25 × 25 см, повторність – 3–5 проб. Додатково застосовували пастки Барбера. Первинну обробку й аналіз матеріалу виконували відповідно до загальноприйнятих методик ґрунтово-зоологічних досліджень (Голубець та ін., 2003; Яворницький, 2010; Dunger, Fiedler, 1989). Класи домінування визначали за Stöcker і Bergmann (1977).

У складі угруповання ґрунтової мезофауни природного старовікового смереково-букового яличника виявлено близько 20 видів і таксонів безхребетних. Загальна чисельність угруповання становила 154 особ.·м⁻², маса – 2,34 г·м⁻². Основна частина мезофауни була зосереджена в лісовій підстилці: 70% загальної чисельності та 86% маси. У ґрунтовому шарі зосереджено відповідно 30 і 14% цих показників (табл.4.6.1).

За чисельністю в угрупованні домінували мокриці (*Oniscoidea* – 25%), двопарноногі багатоніжки (*Diplopoda* – 21%) та губоногі багатоніжки (*Chilopoda* – 34%). За масою найбільшу частку становили *Diplopoda* – 45%, *Oniscoidea* – 17% та *Chilopoda* – 16%. Частка комах становила 14% загальної чисельності та близько 20% маси угруповання. Інші таксономічні групи були представлені меншою кількістю особин. У трофічній структурі угруповання переважали сапрофаги та хижаки. Частка сапрофагів становила 49% чисельності та 64% маси, хижаків – відповідно 38 і 17%, фітофагів – 14 і 19%. У групі сапрофагів домінували двопарноногі багатоніжки та мокриці, які безпосередньо залучені до фрагментації і первинної трансформації рослинного детриту. Серед хижаків переважали губоногі багатоніжки, меншою мірою були представлені павуки.

Таблиця 4.6.1

Різноманіття, показники чисельності (N, особ./м²), маси (m, г/м²) та структура домінування (%) угруповання ґрунтової мезофауни у старовіковому смереково-буковому яличнику

Таксономічна група	підстилка		ґрунт		разом			
	N	m, г	N	m, г	N	%	m, г	%
<i>Lumbricidae</i>	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Oniscoidea</i>	27	0,277	11	0,107	38	25	0,384	17
<i>Aranei</i>	–	–	5	0,027	5	3	0,027	1
Diplopoda								
<i>Julidae</i>	27	0,933	–	–	27	18	0,933	40
<i>Polyzoniidae</i>	5	0,107	–	–	5	3	0,107	5
Chilopoda:								
<i>Lithobiomorpha</i>	27	0,219	21	0,107	48	31	0,326	14
<i>Geophilomorpha</i>	–	–	5	0,037	5	3	0,037	2
Insecta:	21	0,459	–	–	21	14	0,459	20
<i>Cicadidae</i>	5	0,053	–	–	5	3	0,053	2
<i>Curculionidae</i> (im.)	11	0,379	–	–	11	7	0,379	16
<i>Chrysomelidae</i> (im.)	5	0,027	–	–	5	3	0,027	1
<i>Mollusca</i>	–	–	5	0,053	5	3	0,053	2
Разом:	107	1,995	47	0,331	154	100	2,326	100
%%	70%	86%	30%	14%	100%		100%	

Розрахований добовий метаболізм угруповання ґрунтової мезофауни становив 437 Дж·м⁻²·добу⁻¹. У загальному потоці трансформованої енергії 60% припадало на

сапрофагів, 22% – на хижаків і 18% – на фітофагів. Отже, найбільша частка енергетичного потоку проходить через детритний трофічний ланцюг, що узгоджується з переважанням сапрофагів у структурі угруповання (табл.4.6.2).

Ключова ділянка 2. Природний буковий ліс розташований на висоті 1080 м н. р. м. на південному макросхилі Вододільно-Верховинського хребта. Середній вік деревостану – 90 років. Тип деревостану – бучинник вологої бучини левкоєво-шорсткоожинової; асоціація – *Fagetum leucojoso (aestivum)-rubosum (hirtis)*.

У складі угруповання ґрунтової мезофауни виявлено близько 25 видів і таксонів безхребетних. Близько половини таксономічного різноманіття становили комахи; інші групи представлені дощовими червами, мокрицями, двопарноногими та губоногими багатоніжками, павуками й наземними моллюсками. Загальна чисельність мезофауни становила 298 особ./м², а маса – 36,56 г·м⁻².

Таблиця 4.6.2.

Різнманіття, показники чисельності (N, особ./м²), маси (m, г/м²), структура домінування (%), показники добового метаболізму (Q, Дж./м² за добу) угруповання ґрунтової мезофауни старовіковому смереково-буковому яличнику

Таксономічна, трофічна група	Смереково-буковий яличник					
	N	%	m, г	%	Qn	%
Lumbricidae	0	0	0	0	0	0
Aranei	5	3	0,03	1	7	2
Oniscoidea	38	25	0,38	17	84	19
Diplopoda	32	21	1.04	45	169	39
<i>Julidae</i> ,	27	18	0,93	40	150	34
<i>Polyzoniidae</i>	5	3	0,11	5	19	4
Chilopoda:	53	34	0.37	16	87	20
Lithobiomorpha	48	31	0,33	14	78	18
Geophilomorpha	5	3	0,04	2	9	2
Insecta:	21	14	0,46	20	79	18
Cicadidae	5	3	0,05	2	11	3
Curculionidae (im.)	11	7	0,38	16	61	14
Chrysomelidae (im.)	5	3	0,03	1	7	2
Mollusca	5	3	0,05	2	11	3
Разом:	154	100	2,34	100	437	100
Сапрофаги	75	49	1,48	64	264	60
Фітофаги	21	14	0,46	19	79	18
Хижаки	58	38	0,40	17	94	22

Особливістю угруповання була значна чисельність личинок і лялечок *Diptera* – 165 особ./м², а також висока маса *Lumbricidae* – 29,87 г/м². Таким чином, за чисельністю значний внесок у структуру угруповання забезпечували комахи, тоді як за масою чітко домінували дощові черви. Це визначає вагому функціональну роль сапрофагів у трансформації органічної речовини та переміщенні продуктів її розкладу з підстилки до ґрунтового профілю (табл.4.6.3).

Трофічна структура угруповання характеризувалася переважанням сапрофагів, до яких належали *Lumbricidae*, окремі групи *Diplopoda*, сапрофагні личинки двокрилих та наземні молюски. Фітофаги були представлені переважно личинками *Elateridae*, *Chrysomelidae* і *Tenthredinidae*, тоді як до групи хижаків входили *Aranei*, *Geophilomorpha*, *Staphylinidae* та личинки *Adephaga*. Переважання сапрофагного комплексу свідчить про значну роль детритного харчового ланцюга у функціонуванні цього лісового угруповання.

Ключова ділянка 3. Старовіковий буковий ліс розташований на висоті 890 м н. р. м. на південному макросхилі Вододільно-Верховинського хребта. Вік деревостану – 150 років. Рослинна асоціація – бучинник живокостево-дентарійово-шорсткоожиновий (*Fagetum symphytoso-dentarioso-rubosum (hirtis)*).

Загальна чисельність ґрунтової мезофауни на цій ділянці становила 346 особ./м², маса – 8,33 г/м². Порівняно з буковим деревостаном на висоті 1080 м н. р. м. угруповання характеризувалося більшою чисельністю, але істотно меншою загальною масою. В його таксономічній структурі значну частку становили павуки, двопарноногі та губоногі багатоніжки. Високою була чисельність хижих форм, зокрема *Aranei* та *Lithobiomorpha*.

За масою угруповання переважали сапрофаги, серед яких важливу роль відігравали *Lumbricidae*, *Diplopoda*, *Geotrupes* та наземні молюски. Водночас висока частка хижаків за чисельністю свідчить про формування розвиненої трофічної структури, у якій поряд із детритним блоком значну роль відіграє регуляція чисельності інших груп ґрунтових безхребетних (табл.4.6.3).

Порівняння досліджених ділянок показує значну варіабельність структурно-функціональної організації ґрунтової мезофауни навіть у природних і старовікових

лісових екосистемах одного геоморфологічного району. Відмінності проявляються не лише у загальній чисельності й масі безхребетних, а й у співвідношенні трофічних груп та функціональному внеску окремих таксонів. При цьому спільною рисою досліджених угруповань є значна роль сапрофагного комплексу, пов'язаного з детритним каналом трансформації органічної речовини.

Таблиця 4.6.3.

Таксономічне різноманіття, показники чисельності (N, особ./м²), маси (m, мг/м²) та структура трофічного домінування (%) угруповань ґрунтової мезофауни

Таксони, трофічні групи:	Буковий ліс, 1080 м.н.р.м				Буковий ліс, 890 м н.р.м.			
	N	%	m	%	N	%	m	%
Lumbricidae	43	<i>15</i>	29867	<i>82</i>	27	<i>8</i>	1707	<i>20</i>
Aranei	5	<i>2</i>	16	<i>0,04</i>	69	<i>20</i>	651	<i>8</i>
Oniscoidea	-	-	-	-	5	<i>1</i>	27	<i>0,3</i>
Trogulidae	-	-	-	-	11	<i>3</i>	160	<i>2</i>
Diplopoda								
<i>Julus</i>	5	<i>2</i>	1067	<i>3</i>	37	<i>11</i>	1360	<i>16</i>
<i>Polyzonium</i>	5	<i>2</i>	27	<i>0,1</i>	69	<i>20</i>	1066	<i>13</i>
Chilopoda								
Lithobiomorpha	-	-	-	-	59	<i>17</i>	213	<i>3</i>
Geophilomorpha	11	<i>4</i>	149	<i>0,4</i>	16	<i>5</i>	374	<i>4</i>
Insecta								
Carabidae	-	-	-	-	-	-	-	-
Staphylinidae	10	<i>3</i>	117	<i>0,3</i>	11	<i>3</i>	53	<i>1</i>
Adephaga (lar.)	11	<i>4</i>	213	<i>1</i>	-	-	-	-
Cantharidae (lar.)	-	-	-	-	-	-	-	-
Elateridae (im.)	-	-	-	-	-	-	-	-
Elateridae (lar.)	22	<i>8</i>	224	<i>1</i>	11	<i>3</i>	53	<i>1</i>
Curculionidae (im.)	-	-	-	-	-	-	-	-
Curculionidae (lar.)	-	-	-	-	5	<i>1</i>	27	<i>0,3</i>
Chysomelidae	5	<i>2</i>	37	<i>0,1</i>	-	-	-	-
<i>Geotrypes</i> (im.)	-	-	-	-	5	<i>1</i>	1893	<i>23</i>
Diptera (pup. lar.)	165	<i>57</i>	3840	<i>11</i>	5	<i>1</i>	53	<i>1</i>
Tenthredinidae (lar.)	11	<i>4</i>	949	<i>3</i>	-	-	-	-
Mollusca								
Pulmonata	5	<i>2</i>	53	<i>0,1</i>	16	<i>4</i>	693	<i>9</i>
Разом:	298	<i>100</i>	36560	<i>100</i>	346	<i>100</i>	8330	<i>100</i>
Сапрофаги	223	<i>74,8</i>	34854	<i>95,3</i>	164	<i>47,4</i>	6799	<i>81,6</i>
Фітофаги	38	<i>12,8</i>	1210	<i>3,3</i>	16	<i>4,6</i>	80	<i>1,0</i>
Хижаки	37	<i>12,4</i>	496	<i>1,4</i>	166	<i>48,0</i>	1451	<i>17,4</i>

Ґрунтова мезофауна є одним із біотичних агентів, що забезпечують зв'язок між основними блоками лісової екосистеми. Фрагментація рослинного опаду і деревного детриту, його споживання та переміщення сапрофагами сприяють збільшенню доступності органічного субстрату для мікроорганізмів і подальшій біохімічній трансформації. Частина органічного Карбону при цьому мінералізується, а частина продуктів трансформації надходить до ґрунтового пулу і включається у процеси гуміфікації та стабілізації органічної речовини.

Таким чином, структурно-функціональна організація ґрунтової мезофауни є важливою складовою біотичного контролю потоків органічної речовини у старовікових лісових екосистемах. Її функціональна роль реалізується насамперед через детритний харчовий ланцюг і полягає у первинній трансформації органічних решток, їх підготовці до мікробної деструкції та участі у перерозподілі органічної речовини між блоками «підстилка – ґрунт». У такий спосіб ґрунтова мезофауна опосередковано впливає як на швидкість мінералізації органічної речовини, так і на формування довготривалого ґрунтового резервуару органічного Карбону.

Висновки до Розділу 4.

У досліджуваних лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта сумарні запаси органічного Карбону характеризувалися значною просторовою мінливістю та змінювалися від 65,83 до 468,01 т·га⁻¹. Середні сумарні запаси у старовікових лісах південного макросхилу становили 303,10 т·га⁻¹ і були майже вдвічі вищими порівняно зі стиглими лісами північного макросхилу — 161,43 т·га⁻¹. Відмінності між досліджуваними групами були статистично значущими ($t = 4,83$; $p = 6,39 \times 10^{-5}$; d Коена = 1,85).

Основним пулом органічного Карбону в досліджуваних лісових екосистемах була жива фітомаса, на яку припадало близько 72% сумарного запасу. Частка ґрунтового пулу становила близько 14%, грубих деревних залишків — 11%, а лісової підстилки — 3%. Таким чином, величина сумарного запасу Карбону значною мірою визначалася запасами Карбону у живій фітомасі.

Запаси органічного Карбону у фітомасі істотно залежали від віку деревостану. Встановлено сильний позитивний статистично значущий зв'язок між цими показниками ($r_s = 0,88$; $p = 7,60 \times 10^{-9}$). Вищі запаси Карбону у фітомасі були характерні для старовікових лісів південного макросхилу, що значною мірою визначало і відмінності сумарних запасів Карбону між досліджуваними групами.

Запаси органічного Карбону в грубих деревних залишках характеризувалися найвищою внутрішньогруповою варіабельністю серед досліджуваних пулів. Попри вищі середні значення у старовікових лісах південного макросхилу, статистично значущих відмінностей між макросхилами не встановлено ($p = 0,78$), що свідчить про мозаїчний характер накопичення деревного детриту.

У лісовій підстилці старовікових лісів південного макросхилу запаси органічного Карбону були статистично значуще вищими порівняно зі стиглими лісами північного макросхилу ($t = 3,14$; $p = 0,004$; d Коена = 1,23). Вміст органічного Карбону в підстилці змінювався у відносно вузькому діапазоні — 37,63–43,60%, тому міжділянкові відмінності запасів Карбону в цьому пулі визначалися насамперед кількістю накопиченої підстилки. Встановлено також позитивний зв'язок запасів Карбону в підстилці з віком деревостану ($r = 0,54$; $p = 0,004$).

Сумарні запаси органічного Карбону в шарі ґрунту 0–30 см змінювалися від 20,22 до 65,86 т·га⁻¹. Вищі середні значення зафіксовано у стиглих лісах північного макросхилу, однак статистично значущих відмінностей між досліджуваними групами не встановлено ($t = 1,77$; $p = 0,09$). Це свідчить про значну просторову неоднорідність ґрунтового пулу Карбону та його слабшу залежність від вікової структури деревостану порівняно з фітомасою і лісовою підстилкою.

Встановлено сильний позитивний зв'язок між сумарними запасами органічного Карбону та віком деревостану ($r = 0,88$; $p = 2,00 \times 10^{-9}$; $R^2 = 0,78$). Отримані результати свідчать, що зростання сумарних запасів Карбону в старовікових лісах формується насамперед за рахунок тривалого накопичення Карбону у живій фітомасі, тоді як ґрунтовий пул і грубі деревні залишки характеризуються більшою просторовою варіабельністю та слабшою залежністю від віку деревостану.

РОЗДІЛ 5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

5.1. Загальні закономірності акумуляції органічного карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта

Отримані результати свідчать про чітко виражену диференціацію запасів органічного Карбону між основними компонентами лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта. У структурі сумарного запасу домінує фітомаса, частка якої становить 72 %, тоді як у ґрунті акумульовано 14 %, у грубих деревних залишках — 11 %, а в лісовій підстилці — 3 % органічного Карбону. Таке співвідношення відображає функціональну роль окремих пулів у процесах акумуляції, трансформації та довготривалого зберігання органічної речовини. Фітомаса є основним пулом акумуляції Карбону, грубі деревні залишки та підстилка забезпечують його перерозподіл у процесі деструкції органічної речовини, тоді як ґрунтовий пул характеризується більшою інерційністю та довготривалішим утриманням Карбону.

Фітомаса.

Переважаання фітомаси у структурі загальних запасів органічного Карбону, частка якої становить 72 %, зумовлене насамперед віковою та структурною організацією досліджених лісових екосистем. У старовікових насадженнях значні запаси надземної та підземної біомаси формуються внаслідок тривалого розвитку деревостанів за відсутності інтенсивних антропогенних порушень. Зі збільшенням віку дерев зростають їхні середні діаметр і висота, сумарний запас деревини та, відповідно, кількість Карбону, акумульованого у фітомасі.

Ця закономірність чітко проявляється при порівнянні макросхилів Вододільно-Верховинського хребта. На південному макросхилі, де переважають старовікові деревостани, запаси органічного Карбону у фітомасі є істотно вищими: на більшості дослідних ділянок вони перевищують $170 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Натомість на північному макросхилі, представленому переважно молодшими деревостанами, їхні значення не перевищують $170 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

Виявлений статистично значущий зв'язок між віком деревостанів і запасами органічного Карбону у фітомасі підтверджує кумулятивний характер формування цього пулу. Фітомаса є первинним акумулятором Карбону в лісовій екосистемі,

оскільки саме в процесі фотосинтезу атмосферний CO_2 залучається до біологічного кругообігу та накопичується в рослинних тканинах. Тривалий життєвий цикл дерев забезпечує довготривале утримання значної частини цього Карбону в живій біомасі.

Отже, домінування фітомаси в загальній структурі запасів органічного Карбону досліджених лісових екосистем насамперед пов'язане з віком і структурою деревостанів, а найбільші її запаси характерні для старовікових лісів південного макросхилу.

Грунт.

Грунт акумулює 14 % загальних запасів органічного Карбону та є найстабільнішим пулом серед досліджених компонентів лісових екосистем. Запаси ґрунтового органічного Карбону на дослідних ділянках змінювалися від 20,22 до 65,86 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$, а середнє значення для всієї вибірки становило $33,93 \pm 9,36 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Варіювання цих показників відображає просторову неоднорідність ґрунтових умов, мікрорельєфу та потужності ґрунтового профілю.

Висока стабільність ґрунтового пулу пов'язана з тривалим характером процесів надходження, трансформації та стабілізації органічної речовини. Карбон надходить у ґрунт із підстилки, відмерлих частин рослин і кореневих систем, після чого частина органічної речовини мінералізується, а частина закріплюється у складі відносно стабільних органо-мінеральних сполук. Унаслідок цього ґрунтовий пул реагує на зміни структури деревостанів значно повільніше, ніж фітомаса або підстилка.

Стабільність ґрунтового пулу підтверджується відсутністю статистично значущого зв'язку між запасами органічного Карбону та віком деревостанів. Незважаючи на істотні відмінності вікової структури лісів північного і південного макросхилів, запаси Карбону в ґрунті характеризуються значно меншою контрастністю, ніж у фітомасі та підстилці. Це свідчить про здатність ґрунтового пулу тривалий час зберігати акумульований Карбон навіть за зміни стану надземної частини екосистеми.

Водночас встановлено слабкий негативний зв'язок між крутизною схилу та запасами органічного Карбону в ґрунті. Зі збільшенням ухилу посилюються поверхневий стік і площинний змив, що створює умови для втрати частини органо-

мінерального матеріалу та зменшення потужності ґрунтового профілю. Особливо виразно це проявляється на південному макросхилі, де схили є крутішими, а на окремих дослідних ділянках № 8, 18 і 26 материнська порода залягає близько до денної поверхні.

Отже, запаси органічного Карбону в ґрунті визначаються передусім довготривалістю ґрунтоутворювальних процесів і морфометричними особливостями території. Відсутність залежності від віку деревостанів та слабкий негативний зв'язок із крутизною схилу підтверджують, що ґрунт є найбільш інерційним і стабільним пулом органічного Карбону в досліджених лісових екосистемах.

Грубі деревні залишки.

Грубі деревні залишки акумулюють близько 11 % загальних запасів органічного Карбону та характеризуються найбільшою просторовою варіабельністю серед досліджених пулів. Запаси Карбону в окремих ділянках змінювалися від 0,86 до 85,60 т·га⁻¹, середнє значення становило $26,12 \pm 27,38$ т·га⁻¹, а медіана — 18,32 т·га⁻¹. Значна різниця між середнім і медіанним значеннями, а також високе стандартне відхилення свідчать про асиметричний характер розподілу, зумовлений наявністю окремих ділянок із дуже високими запасами мертвої деревини.

Така просторова мінливість є закономірним наслідком мозаїчної динаміки лісових екосистем. На відміну від фітомаси, запаси якої формуються переважно поступово в процесі росту деревостанів, кількість грубих деревних залишків може істотно змінюватися внаслідок локальних імпульсних порушень. До них належать буреломи, вітровали, морозобоїни, тривалі посушливі періоди, пошкодження дерев фіто- та ксилофагами, ураження фітопатогенними грибами, а також інші природні або антропогенні чинники. Їхня дія може спричиняти ослаблення, пошкодження або відмирання як окремих дерев, так і окремих куртин деревостану, формуючи локальні осередки підвищеного накопичення.

Істотне значення для формування таких осередків мають морфометричні та едафічні умови. На крутих схилах стійкість деревостанів значною мірою залежить від потужності ґрунтового профілю, щербенистості ґрунтів і характеру закріплення кореневих систем. Невелика потужність ґрунту та значний вміст скелетного

матеріалу обмежують можливості розвитку й закріплення кореневих систем. За таких умов інтенсивні зливові опади, особливо на крутих схилах, можуть посилювати поверхневий і внутрішньогрунтовий стік, локальне перезволоження та механічну нестійкість дерев. У поєднанні із сильними вітрами це підвищує ймовірність вітровалів і куртинного відмирання деревостану.

Посушливі періоди діють за іншим механізмом, спричиняючи водний стрес і фізіологічне ослаблення дерев. Ослаблені дерева стають більш чутливими до пошкодження фіто- та ксилофагами й ураження фітопатогенними грибами, а поєднання кількох стресових чинників може призводити до локального збільшення смертності дерев. Таким чином, формування запасів часто є результатом не дії одного окремого чинника, а їх послідовного або одночасного впливу.

У старовікових лісах важливим джерелом є також природна вікова динаміка деревостанів. Постійне відмирання окремих дерев і куртин забезпечує безперервне надходження мертвої деревини та формування різних стадій її розкладу. Однак запас у конкретний момент часу визначається не лише віком деревостану, а й співвідношенням між надходженням нової мертвої деревини та швидкістю її деструкції. Тому старовікові ліси можуть характеризуватися як дуже високими, так і порівняно невеликими локальними запасами залежно від стадії розвитку конкретної ділянки та історії попередніх порушень.

Це узгоджується з результатами статистичного аналізу: прямих залежностей запасів від окремих досліджених біотичних чи абіотичних чинників не виявлено, а відмінності між північним і південним макросхилами не були статистично значущими. Відсутність такої залежності не свідчить про відсутність впливу екологічних чинників, а відображає багатофакторний та імпульсний характер формування цього пулу.

Антропогенний вплив також може суттєво змінювати запаси. Вилучення мертвої деревини під час санітарних та інших лісгосподарських заходів зменшує її кількість, тоді як після рубок або інших порушень на окремих ділянках можуть тимчасово формуватися значні запаси залишеної деревини. Тому величина цього

пулу відображає не лише сучасний стан деревостану, а й історію його природного та господарського розвитку.

Функціонально є проміжним пулом у трансформації органічного Карбону між живою фітомасою та ґрунтом. Під час розкладу частина Карбону мінералізується, а частина органічної речовини поступово включається до підстилки та ґрунтового пулу. Інтенсивність цього процесу залежить від породного складу і розмірів деревних залишків, ступеня їх розкладу, температурно-вологісних умов та характеру контакту деревини з поверхнею ґрунту.

Отже, висока просторова варіабельність запасів органічного Карбону в є закономірною властивістю цього пулу і відображає мозаїчність природної динаміки старовікових лісів. Її формують взаємодія вікової структури деревостанів, локальних біотичних й абіотичних порушень, рельєфу, потужності та щербистості ґрунтового профілю, а також історії антропогенного впливу. Саме багатофакторність формування пояснює значну мінливість його запасів між окремими дослідними ділянками.

Підстилка

Лісова підстилка акумулює близько 3 % загальних запасів органічного Карбону і є найдинамічнішим серед досліджених пулів. На 26 дослідних ділянках запаси органічного Карбону в підстилці змінювалися від 2,85 до 10,59 т·га⁻¹, середнє значення становило $6,75 \pm 1,82$ т·га⁻¹, а медіана — 6,91 т·га⁻¹. Близькість середнього та медіанного значень свідчить про відносно симетричний характер розподілу цього показника.

Величина запасів Карбону в підстилці визначається співвідношенням між надходженням рослинного опаду та інтенсивністю його деструкції. На відміну від фітомаси й ґрунту, цей пул характеризується коротким періодом обороту органічної речовини і швидко реагує на зміни структури деревостану, мікрокліматичних умов та антропогенний вплив. Тому відносно невелика частка підстилки у сумарному запасі Карбону не зменшує її функціонального значення в карбоновому циклі лісових екосистем.

У досліджених лісах встановлено статистично значущий зв'язок між віком деревостану та запасами органічного Карбону в підстилці. Зі збільшенням віку деревостанів її запаси зростають, що пов'язано зі збільшенням надходження органічного опаду та формуванням стабільнішого піднаметового мікроклімату. Ця закономірність проявляється і при порівнянні макросхилів: у старовікових лісах південного макросхилу запаси Карбону в підстилці загалом вищі, ніж у молодших деревостанах північного макросхилу. За результатами регресійного аналізу зі збільшенням віку деревостану на один рік запаси органічного Карбону в підстилці зростають приблизно на $20 \text{ кг} \cdot \text{га}^{-1}$.

Водночас вік деревостану не є єдиним чинником, який визначає величину цього пулу. Запаси підстилки залежать від породного складу, кількості та сезонності опаду, температурно-вологісних умов, рельєфу, інтенсивності поверхневого стоку, переміщення опаду вітром і швидкості його мінералізації. Тому навіть у межах старовікових насаджень можливі значні локальні відмінності в накопиченні підстилки.

Особливо чутливо цей пул реагує на порушення структури деревостану. Після рубок або інших впливів, що різко зменшують надходження рослинного опаду й змінюють мікроклімат поверхні ґрунту, запаси підстилки можуть швидко знижуватися. Така закономірність простежується на ділянці № 4, де порушення деревного ярусу супроводжується мінімальними запасами органічного Карбону в підстилці.

Функціонально підстилка є основною ланкою перенесення органічної речовини від живої фітомаси до ґрунту. У процесі деструкції частина Карбону мінералізується, а частина органічних сполук надходить до верхніх горизонтів ґрунту та включається в подальші процеси трансформації і стабілізації. Тому підстилка виконує не стільки функцію довготривалого депонування, скільки регулює інтенсивність і безперервність потоку органічного Карбону між надземною фітомасою та ґрунтом.

Отже, невелика частка підстилки у загальному запасі органічного Карбону поєднується з її високою функціональною значущістю. Запаси цього пулу відображають баланс між продукцією органічного опаду та швидкістю його

трансформації і є чутливими до вікової структури деревостанів, локальних екологічних умов та антропогенних порушень.

Отже, вертикальна організація пулів органічного Карбону в досліджених лісових екосистемах відображає різну тривалість його утримання та трансформації в окремих компонентах. Фітомаса є основним пулом акумуляції Карбону в живій біомасі, ґрунт забезпечує його найбільш тривале та інерційне зберігання, грубі деревні залишки є динамічним проміжним пулом між живою фітомасою та ґрунтом, а підстилка характеризується найшвидшим обігом органічної речовини та високою чутливістю до змін умов функціонування екосистеми. Сукупність цих компонентів забезпечує безперервність надходження, трансформації та перерозподілу органічного Карбону в лісовій екосистемі.

Відмінності у структурі запасів між північним і південним макросхилами пов'язані насамперед із різною віковою структурою деревостанів, ступенем їх природності та локальними екологічними умовами. Південний макросхил, де переважають старовікові ліси, характеризується вищими запасами органічного Карбону у фітомасі та підстилці, а також загалом більшими запасами грубих деревних залишків. Це відображає триваліший період безперервного розвитку деревостанів, більші запаси живої біомаси та постійне надходження органічної речовини до детритних пулів.

На північному макросхилі, де значну частку становлять стиглі та пристигаючі деревостани, запаси Карбону у фітомасі та підстилці є нижчими. Така структура значною мірою пов'язана з історією лісогосподарського використання та молодшим віком насаджень. Водночас запаси ґрунтового органічного Карбону між макросхилами відрізняються значно менше, що підтверджує більшу інерційність цього пулу та його слабшу залежність від сучасної вікової структури деревостанів.

Таким чином, просторові відмінності у співвідношенні пулів органічного Карбону є результатом взаємодії вікової структури деревостанів, природної динаміки лісів, особливостей рельєфу й ґрунтових умов, а також історії антропогенного впливу.

Узагальнення отриманих результатів дає підстави розглядати структуру запасів органічного Карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта як

функціонально диференційовану систему. Фітомаса формує основний запас Карбону, ґрунт виконує роль найбільш стабільного довготривалого резервуару, грубі деревні залишки забезпечують поступову передачу органічної речовини від живої біомаси до ґрунту, а підстилка є найбільш динамічною ланкою цього процесу. Встановлене співвідношення 72–14–11–3 % відображає домінування живої фітомаси у загальній структурі запасів Карбону та різну функціональну роль окремих пулів у його накопиченні й трансформації.

5.2. Вплив експозиції макросхилів на запаси органічного Карбону

Відмінності у запасах органічного Карбону між північним і південним макросхилами Вододільно-Верховинського хребта формуються під впливом комплексу взаємопов'язаних чинників. Найбільше значення мають вікова структура деревостанів, ступінь їх природності, експозиція макросхилів, особливості рельєфу та ґрунтових умов. У сукупності вони визначають інтенсивність накопичення Карбону у фітомасі, надходження органічної речовини до детритних пулів і умови її подальшої трансформації в ґрунті.

Найвиразніше макросхилова диференціація проявляється у запасах Карбону у фітомасі та підстилці. Південний макросхил представлений переважно старовіковими деревостанами, тоді як на північному більшу частку становлять стиглі та пристигаючі ліси, що в минулому зазнавали інтенсивнішого господарського використання. Тому відмінності між макросхилами відображають не лише їхні природні екологічні умови, але й різну історію формування та використання лісових екосистем.

Водночас ґрунтовий пул характеризується значно меншою контрастністю між макросхилами, що підтверджує його вищу інерційність порівняно з надземними компонентами. Для грубих деревних залишків просторові відмінності мають більш мозаїчний характер і значною мірою залежать від локальної динаміки деревостанів та імпульсних природних і антропогенних порушень.

Отже, макросхилова диференціація запасів органічного Карбону є результатом поєднаної дії біотичних, абіотичних та антропогенних чинників, вплив яких неоднаково проявляється в окремих пулах лісової екосистеми.

Кліматичні та мікрокліматичні відмінності макросхилів

Експозиція макросхилів зумовлює відмінності в надходженні сонячної радіації, температурному режимі та умовах зволоження, що впливає на функціонування лісових екосистем і трансформацію органічної речовини. Північні схили отримують менше прямої сонячної радіації, тому характеризуються нижчим тепловим навантаженням і повільнішим висиханням ґрунтового покриву. Південні експозиції, навпаки, зазвичай мають вищу інсоляцію та інтенсивніше прогрівання поверхні.

Такі відмінності можуть по-різному впливати на окремі пули органічного Карбону. На північному макросхилі нижчі температури та триваліше збереження вологи створюють умови для повільнішої трансформації органічної речовини у верхніх горизонтах ґрунту. Це узгоджується з відносно меншою контрастністю запасів ґрунтового Карбону між ділянками та більшою інерційністю цього пулу порівняно з фітомасою і підстилкою.

На південному макросхилі вища інсоляція та більша кількість тепла протягом вегетаційного періоду створюють сприятливі умови для продукційних процесів. Однак вищі запаси Карбону у фітомасі цього макросхилу не можна пояснювати лише кліматичними умовами, оскільки тут одночасно переважають старовікові деревостани з тривалішим періодом природного розвитку. Отже, вплив експозиції реалізується у взаємодії з віком, структурою та ступенем природності лісів.

Підвищене теплове навантаження на південних експозиціях може також прискорювати деструкцію органічної речовини в підстилці. Водночас у старовікових лісах постійне надходження рослинного опаду підтримує цей пул, тому його величина визначається балансом між продукцією опаду та швидкістю розкладу. Саме поєднання високої біопродуктивності деревостанів із безперервним надходженням органічної речовини пояснює вищі запаси Карбону в підстилці на більшості ділянок південного макросхилу.

Відмінності у водному режимі також можуть впливати на формування ґрунтового пулу. Північні експозиції, завдяки меншій інсоляції та повільнішому випаровуванню, довше зберігають ґрунтову вологу. На південному макросхилі вищі температури й інтенсивніше випаровування поєднуються з більшою крутизною

схилів і меншою потужністю ґрунтового профілю, що підсилює роль рельєфу та едафічних умов у формуванні запасів органічного Карбону.

Таким чином, кліматичні та мікрокліматичні відмінності між макросхилами є важливою складовою просторової диференціації запасів органічного Карбону, однак їхній вплив реалізується у взаємодії з віковою структурою деревостанів, рельєфом і властивостями ґрунтового покриву.

Роль рельєфу, експозиції, кута нахилу схилу та ґрунтових умов

Рельєф і ґрунтові умови суттєво модифікують просторовий розподіл запасів органічного Карбону в межах Вододільно-Верховинського хребта. Крутизна схилу впливає на інтенсивність поверхневого стоку, ерозійні процеси, потужність ґрунтового профілю та умови закріплення кореневих систем. На крутіших ділянках зростає ймовірність площинного змиву дрібнодисперсної органо-мінеральної фракції, що може призводити до зменшення потужності гумусованих горизонтів і запасів ґрунтового органічного Карбону.

Для південного макросхилу характерні більші ухили та значна щєбенистість ґрунтів. У зразках бурих лісових і дерново-буроземних ґрунтів частка скелетного матеріалу становить у середньому близько 35 %, а потужність ґрунтового профілю на окремих ділянках не перевищує 35–50 см. Таке поєднання обмежує об'єм дрібнозему, в якому може акумулюватися органічна речовина, та одночасно сприяє високій дренажності ґрунтів. За значної крутизни схилів це створює умови для посиленого винесення частини органічного матеріалу з поверхневим і внутрішньогрунтовим стоком.

Залежність між крутизною схилу та запасами ґрунтового органічного Карбону проявляється як слабкий негативний зв'язок. Це свідчить про те, що рельєф впливає на ґрунтовий пул, однак не є єдиним чинником, який визначає його величину. Навіть за істотних відмінностей у морфометричних характеристиках ділянок ґрунтовий пул залишається відносно стабільним, що відображає його високу інерційність і тривалий характер формування.

Експозиція макросхилів додатково модифікує ці процеси через відмінності у тепловому та водному режимах. На північному макросхилі, де схили в середньому

пологіші та умови зволоження стабільніші, ґрунтовий профіль є менш чутливим до поверхневого змиву. На південному макросхилі поєднання більшої крутизни, меншої потужності ґрунту, високої щебенистості та інтенсивнішого прогрівання створює контрастніші умови для трансформації та втрат органічної речовини.

Рельєф і ґрунтові умови впливають також на формування запасів грубих деревних залишків. На крутих схилах із малопотужними та щебенистими ґрунтами кореневі системи дерев мають обмежені можливості для глибокого закріплення. За умов сильних вітрів або інтенсивних зливових опадів це може підвищувати ризик локальних вітровалів і куртинного відмирання деревостану. Таким чином, морфометричні та едафічні особливості можуть опосередковано впливати на просторову мозаїчність запасів.

Для підстилки рельєф визначає не лише умови її накопичення, але й можливість просторового переміщення органічного матеріалу. На крутих схилах частина опадів може переміщуватися вниз по схилу під дією поверхневого стоку та вітру, тоді як у локальних пониженнях, біля повалених стовбурів або інших природних бар'єрів органічний матеріал може акумулюватися. Унаслідок цього навіть на невеликій відстані формуються ділянки з різними запасами підстилки та грубих деревних залишків.

Отже, рельєф, експозиція макросхилів і ґрунтові умови визначають просторову неоднорідність середовища, у межах якого формуються окремі пули органічного Карбону. Найвиразніше їхній вплив проявляється через крутизну схилів, потужність і щебенистість ґрунтового профілю, дренажність, інтенсивність поверхневого стоку та стійкість деревостанів до локальних порушень. Водночас дія цих чинників реалізується у взаємодії з віковою структурою та ступенем природності лісових екосистем.

Отже, відмінності у запасах органічного Карбону між північним і південним макросхилами Вододільно-Верховинського хребта формуються внаслідок взаємодії вікової структури деревостанів, експозиції, рельєфу та ґрунтових умов. Південний макросхил характеризується вищими запасами Карбону у фітомасі та підстилці, що насамперед пов'язано з переважанням старовікових деревостанів і тривалішим

періодом їх природного розвитку. Для північного макросхилу характерна менша контрастність ґрунтового пулу, що відображає його вищу інерційність і слабшу залежність від сучасної вікової структури лісів. Просторовий розподіл має більш мозаїчний характер і визначається поєднанням природної динаміки деревостанів, локальних порушень та морфометричних і едафічних умов.

Таким чином, макросхилова диференціація запасів органічного Карбону не може бути пояснена дією одного окремого чинника. Вона є результатом сукупного впливу біотичних, абіотичних та антропогенних факторів, серед яких провідне значення для фітомаси та підстилки має вікова структура деревостанів, тоді як для ґрунтового пулу більшої ваги набувають властивості ґрунтового профілю та рельєфу.

5.3. Роль вікової структури лісів у формуванні пулів органічного карбону

Вікова структура деревостанів є одним із основних чинників формування запасів органічного Карбону в лісових екосистемах. Її вплив найбільш виразно проявляється у фітомасі та підстилці, тоді як для ґрунтового пулу він є значно слабшим, а для грубих деревних залишків поєднується з дією локальних природних і антропогенних порушень.

Старовікові ліси характеризуються різновіковою та просторово неоднорідною структурою деревостанів, наявністю дерев різних розмірних і вікових груп, природних вікон поновлення та значної кількості мертвої деревини на різних стадіях розкладу. Така структурна мозаїчність забезпечує одночасне протікання процесів росту, відмирання та деструкції органічної речовини і підтримує безперервне надходження Карбону до різних компонентів екосистеми.

Найбезпосередніше вікова структура впливає на запаси Карбону у фітомасі. Тривалий період розвитку старовікових деревостанів забезпечує формування великих запасів деревини та значної підземної біомаси. У досліджених екосистемах це підтверджується суттєво вищими запасами органічного Карбону у фітомасі старовікових лісів південного макросхилу порівняно з переважно стиглими та пристигаючими деревостанами північного макросхилу.

Вікова структура також визначає характер надходження органічної речовини до детритних пулів. У старовікових лісах природне відмирання окремих дерев і куртин забезпечує постійне формування грубих деревних залишків різного ступеня розкладу, а різновікова структура деревостану підтримує безперервне надходження рослинного опаду до підстилки. Водночас конкретні запаси у межах окремих ділянок можуть істотно відрізнятися залежно від історії локальних порушень і стадії розвитку деревостану.

Вплив віку деревостанів на ґрунтовий пул є менш виразним. Відсутність статистично значущої залежності запасів ґрунтового органічного Карбону від віку свідчить про більшу інерційність цього компонента та його тривалий час формування. Тому зміни вікової структури надземної частини екосистеми не супроводжуються пропорційними змінами запасів Карбону в ґрунті.

Таким чином, вікова структура визначає не лише величину окремих пулів органічного Карбону, але й співвідношення між процесами його накопичення, надходження до детритних компонентів та подальшої трансформації. Найчіткіше цей вплив проявляється у фітомасі та підстилці, тоді як запаси значною мірою залежать від мозаїчної динаміки деревостанів, а ґрунтовий пул зберігає відносну стабільність.

Старовікові ліси як акумулятори довготривалого карбону

Старовікові ліси характеризуються складною віковою та просторовою структурою деревостанів, значними запасами живої біомаси, наявністю мертвої деревини різного ступеня розкладу та безперервним надходженням рослинного опаду. Сукупність цих ознак створює умови для тривалого утримання органічного Карбону в різних компонентах лісової екосистеми.

Найбільший внесок у загальні запаси Карбону забезпечує фітомаса. Тривалий період розвитку старовікових деревостанів сприяє накопиченню значних запасів стовбурової деревини, гілок і кореневої біомаси. У досліджених екосистемах це підтверджується істотно вищими запасами органічного Карбону у фітомасі старовікових лісів південного макросхилу порівняно з молодшими деревостанами північного.

Найбільший внесок у загальні запаси Карбону забезпечує фітомаса. Тривалий період розвитку старовікових деревостанів сприяє накопиченню значних запасів стовбурової деревини, гілок і кореневої біомаси. У досліджених екосистемах це підтверджується істотно вищими запасами органічного Карбону у фітомасі старовікових лісів південного макросхилу — $241,78 \pm 85,44 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ порівняно зі $103,97 \pm 45,60 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ на північному макросхилі. Така різниця узгоджується з істотно старшою віковою структурою деревостанів південного макросхилу.

Природна мозаїчність старовікових деревостанів забезпечує постійне надходження органічної речовини до детритних пулів. Відмирання окремих дерев і куртин формує грубі деревні залишки різних стадій розкладу, тоді як безперервний рослинний опад підтримує запаси підстилки. Одночасна присутність живої біомаси, свіжої мертвої деревини та різних стадій її деструкції забезпечує безперервність трансформації органічного Карбону в межах екосистеми.

Запаси у старовікових лісах при цьому можуть істотно варіювати між окремими ділянками. Їхня величина залежить від стадії розвитку деревостану, інтенсивності локального відмирання, попередніх природних порушень та швидкості розкладу деревини. Тому старовіковий стан створює передумови для формування значного пулу, однак не визначає його величину однозначно.

Підстилка в старовікових лісах підтримується постійним надходженням органічного опаду. Її запас формується внаслідок балансу між надходженням рослинного матеріалу та швидкістю його деструкції. Завдяки структурній складності та стабільнішому піднаметовому мікроклімату цей потік є відносно безперервним, хоча його інтенсивність може відрізнятися залежно від локальних екологічних умов.

Вплив старовіковості на ґрунтовий пул проявляється менш безпосередньо. Органічна речовина надходить до ґрунту з підстилки, відмерлої кореневої біомаси та продуктів розкладу грубих деревних залишків, однак формування стабільного ґрунтового пулу відбувається протягом тривалого часу. Відсутність статистично значущого зв'язку між віком деревостанів і запасами ґрунтового Карбону свідчить про високу інерційність цього компонента.

Отже, роль старовікових лісів у довготривалому акумулюванні органічного Карбону визначається поєднанням значних запасів живої біомаси, безперервного надходження органічної речовини та структурної мозаїчності деревостанів. Найвиразніше цей ефект проявляється у фітомасі та підстилці, тоді як запаси мають мозаїчний характер, а ґрунтовий пул відзначається найбільшою інерційністю.

Особливості акумуляції органічного Карбону у стиглих і старовікових деревостанах

У цьому дослідженні під стиглими розуміємо деревостани, що досягли віку стиглості відповідно до лісівничої класифікації, тоді як старовікові ліси характеризуються значно тривалішим періодом природного розвитку, складною різновіковою структурою та наявністю повного спектра стадій росту, відмирання і поновлення дерев. Таким чином, поняття «стиглий» і «старовіковий» відображають різні аспекти вікового стану лісових екосистем і не є тотожними.

У стиглих букових деревостанах темпи приросту фітомаси поступово сповільнюються порівняно з молодшими віковими стадіями, однак накопичення органічного Карбону продовжується. Зі збільшенням віку деревостанів зростають запаси стовбурової деревини та кореневої біомаси, водночас змінюється співвідношення між процесами приросту, природного відмирання та надходження органічної речовини до детритних пулів.

У старовікових деревостанах дедалі більшого значення набуває структурний перерозподіл Карбону між окремими компонентами екосистеми. Значна частина Карбону залишається акумульованою у живій фітомасі, однак одночасно зростає роль грубих деревних залишків, підстилки та ґрунтового пулу. Природне відмирання окремих дерев і куртин забезпечує надходження мертвої деревини різних стадій розкладу, тоді як безперервний рослинний опад підтримує потік органічної речовини до підстилки й ґрунту.

Отже, перехід від стиглого до старовікового стану супроводжується не припиненням накопичення Карбону, а зміною його темпів і структури розподілу між пулами. Якщо у стиглих деревостанах основний приріст запасів пов'язаний із живою фітомасою, то у старовікових лісах дедалі більшу роль відіграють процеси

природного відмирання, трансформації детриту та довготривалого утримання Карбону в різних компонентах екосистеми.

5.4. Індивідуальні та екстремальні випадки

Аналіз просторового розподілу запасів органічного Карбону виявив окремі ділянки з показниками, що суттєво відрізняються від середніх значень відповідних пулів. Такі локальні екстремуми не слід розглядати лише як статистичні відхилення, оскільки вони відображають специфічне поєднання історії розвитку деревостану, характеру порушень, рельєфу та ґрунтових умов. Їх аналіз дає змогу уточнити механізми формування окремих пулів Карбону та межі дії загальних закономірностей, встановлених для досліджуваної території.

Найвиразнішим прикладом антропогенно трансформованої екосистеми є ділянка № 4, де після суцільної рубки старовікового букового лісу сформувалася принципово інша структура запасів Карбону. Запаси органічного Карбону в підстилці становлять лише $2,85 \pm 0,53 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, у ґрунті — $25,49 \pm 3,57 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, тоді як у вони досягають $51,82 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Така структура відображає наслідки різкого порушення деревного ярусу: припинення регулярного надходження листового та дрібного деревного опаду призвело до зменшення запасів підстилки, тоді як значна кількість залишеної після рубки деревини сформувала локально високий запас .

Зменшення запасів Карбону в ґрунті на ділянці № 4 порівняно із суміжною ділянкою № 5 може бути пов'язане з комплексом післярубних змін. Вилучення деревного ярусу зменшує надходження органічної речовини з корневих систем, змінює температурно-вологісний режим поверхні ґрунту та підвищує його відкритість до ерозійних процесів. За умов схилового рельєфу це сприяє посиленню площинного змиву та втраті частини гумусованого матеріалу. Отже, навіть найбільш інерційний ґрунтовий пул може реагувати на інтенсивні порушення, хоча його зміни відбуваються повільніше, ніж у підстилці чи надземних компонентах.

Інший тип локального відхилення спостерігається на ділянці № 14. Незважаючи на вік деревостану понад 100 років, тут зафіксовано відносно низькі запаси органічного Карбону в підстилці. Це підтверджує, що вік деревостану не є єдиним чинником її накопичення. Значний ухил схилу, слабша зімкнутість крон і положення

ділянки між двома ярами створюють умови для переміщення підстилки поверхневим стоком та повітряними потоками. У результаті надходження органічного опаду не обов'язково супроводжується його локальним накопиченням, а частина матеріалу може перерозподілятися вниз по схилу.

Протилежну ситуацію демонструє ділянка № 7, де за значної крутизни схилу запаси Карбону в підстилці становлять $10,59 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а в — $79,41 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Це свідчить про те, що сам по собі кут нахилу не визначає величину органічних запасів. Значна кількість грубих деревних залишків різного ступеня розкладу може створювати локальні бар'єри для переміщення органічного матеріалу, затримувати підстилку та дрібнодисперсні органічні фракції у мікропониженнях і таким чином частково компенсувати дію схилових процесів.

Високі запаси на ділянках № 4, 6, 7, 13 і 16 також мають різне походження. У старовікових лісах вони можуть бути наслідком природного відмирання окремих дерев або куртин, вітровалів та інших локальних порушень, тоді як у трансформованих деревостанах значні запаси мертвої деревини можуть формуватися внаслідок лісогосподарських втручань. Тому локальні максимуми відображають не аномальність системи, а конкретну стадію її розвитку та історію попередніх порушень.

Іншу групу локальних екстремумів формують ділянки № 2, 3, 5, 10, 15 і 23 з високими запасами ґрунтового органічного Карбону. Для більшості з них характерні невеликі кути нахилу схилів, що зменшує інтенсивність площинного змиву та сприяє збереженню потужнішого ґрунтового профілю. За поєднання стабільного рослинного покриву, достатнього зволоження та слабшого прояву ерозійних процесів створюються сприятливі умови для тривалого акумулювання органічної речовини в ґрунті.

Отже, аналіз локальних екстремумів показує, що відхилення від середніх значень окремих пулів не суперечать установленим закономірностям, а відображають багатофакторність їх формування. Для підстилки особливо важливими є безперервність надходження опаду та можливість його локального утримання; для — історія природних і антропогенних порушень; для ґрунтового пулу — рельєф,

потужність ґрунтового профілю та інтенсивність ерозійних процесів. Саме такі локальні випадки демонструють, що просторовий розподіл органічного Карбону формується внаслідок взаємодії загальних регіональних закономірностей із специфічними умовами окремих ділянок.

5.5. Порівняння результатів запасів органічного Карбону ділянок досліджень Вододільно-Верховинського хребта з іншими регіонами Карпат.

Порівняння отриманих результатів із даними для інших регіонів Карпат дає змогу оцінити особливості акумуляції органічного Карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта в ширшому карпатському контексті. Для цього до аналізу залучено результати досліджень лісових екосистем Сколівських Бескидів, Польських Бескидів, Словацьких Карпат та Румунських Карпат, які відрізняються за віковою і породною структурою деревостанів, орографічними, ґрунтовими та кліматичними умовами, а також характером і тривалістю антропогенного впливу.

Найближчим за природними умовами регіоном для порівняння є Сколівські Бескиди, що дає можливість простежити особливості формування окремих пулів Карбону в межах Українських Карпат. Дані для Польських Бескидів та Словацьких Карпат розширюють порівняння на західну частину Карпатської гірської системи та є особливо важливими для оцінювання запасів Карбону у старовікових букових і мішаних лісах. Результати досліджень Румунських Карпат використано як ширший південнокарпатський контекст, що дає змогу оцінити діапазон мінливості Карбонових пулів за інших висотно-кліматичних та едафічних умов.

Безпосереднє зіставлення абсолютних величин запасів Карбону між різними дослідженнями має певні обмеження, пов'язані з відмінностями методичних підходів, глибиною відбору ґрунту, врахуванням скелетної фракції, способами оцінювання фітомаси та грубих деревних залишків. Тому порівняльний аналіз спрямовано передусім на зіставлення діапазонів значень, співвідношення основних пулів та екологічних чинників, що визначають їх просторову мінливість.

Такий підхід дає змогу встановити, які закономірності акумуляції органічного Карбону є спільними для лісових екосистем Карпат, а які формуються під впливом

регіональних особливостей рельєфу, ґрунтового покриву, клімату, вікової структури деревостанів та історії природокористування.

5.5.1. Сколівські Бескиди (Україна)

Сколівські Бескиди є найбільш близьким за природними умовами регіоном для порівняння з лісовими екосистемами Вододільно-Верховинського хребта. Обидві території належать до Українських Карпат, характеризуються значним поширенням букових і мішаних лісів, гірським рельєфом та вираженою просторовою мінливістю ґрунтових і мікрокліматичних умов. Водночас вони відрізняються структурою деревостанів, характером господарського використання та співвідношенням природних і трансформованих лісових екосистем. Це дає змогу використати Сколівські Бескиди не лише для зіставлення абсолютних величин запасів органічного Карбону, але й для порівняння чинників, що визначають просторову мінливість окремих пулів.

Фітомаса

Для заповідної зони НПП «Сколівські Бескиди» середня щільність запасів Карбону у фітомасі лісових насаджень становить $244 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, причому найбільші значення характерні для букових насаджень (Токар, Король, Густі, 2021). Оцінювання проводили на 54 пробних площах із використанням алометричних залежностей для окремих компонентів фітомаси.

Отримане значення є близьким до середнього запасу органічного Карбону у фітомасі старовікових лісів південного макросхилу Вододільно-Верховинського хребта — $241,78 \pm 85,44 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Така подібність свідчить, що високі запаси Карбону у фітомасі старовікових букових лісів досліджуваної території перебувають у межах значень, характерних для добре збережених букових лісових екосистем Сколівських Бескидів.

Водночас середнє значення для всієї сукупності досліджених деревостанів Вододільно-Верховинського хребта є нижчим — $179,79 \pm 92,40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, що пов'язано з включенням до вибірки стиглих і пристигаючих деревостанів північного макросхилу та окремих трансформованих ділянок. Отже, при порівнянні близьких за віковою та структурною організацією лісів відмінності між двома регіонами істотно

зменшуються, що додатково підтверджує важливу роль вікової структури деревостанів у формуванні запасів Карбону у фітомасі.

Лісова підстилка

У межах Вододільно-Верховинського хребта запаси органічного Карбону в лісовій підстилці змінюються від 2,85 до 10,59 т·га⁻¹ при середньому значенні $6,75 \pm 1,82$ т·га⁻¹. У старовікових лісах південного макросхилу вони становлять 6,13–10,59 т·га⁻¹ із середнім значенням $7,72 \pm 0,88$ т·га⁻¹. Для Сколівських Бескидів за результатами маршрутних досліджень на восьми трансектах встановлено близький діапазон запасів органічного Карбону в підстилці — приблизно 3–11 т·га⁻¹ (Чернявська, Шпаківська, 2022).

Подібність діапазонів свідчить, що абсолютна величина цього пулу в букових і мішаних лісах обох регіонів формується в близьких межах. Водночас просторовий розподіл запасів Карбону в підстилці визначається різним поєднанням чинників. У межах Вододільно-Верховинського хребта найбільш виразно проявляється зв'язок із віковою структурою деревостанів: вищі запаси характерні для старовікових лісів південного макросхилу. Однак цей ефект реалізується у взаємодії з експозицією, крутизною схилу, мікрорельєфом та умовами утримання органічного матеріалу на поверхні ґрунту.

У Сколівських Бескидах просторову мінливість запасів Карбону в підстилці пов'язують насамперед із породним складом деревостанів та орографічними характеристиками території — висотою над рівнем моря, експозицією і крутизною схилів (Чернявська, Шпаківська, 2022). Зміна цих параметрів впливає на температурно-вологісний режим поверхні ґрунту, кількість рослинного опаду та швидкість його трансформації.

Таким чином, близькі абсолютні запаси органічного Карбону в підстилці в обох регіонах не означають повної подібності механізмів їх формування. Для Вододільно-Верховинського хребта більш виразним є внесок вікової структури деревостанів і тривалості їх природного розвитку, тоді як у Сколівських Бескидах значну роль відіграє орографічна неоднорідність території. В обох випадках кінцева величина

запасу підстилки визначається балансом між надходженням рослинного опаду, його розкладом і просторовим перерозподілом.

Антропогенний вплив додатково модифікує цей пул. Для Сколівських Бескидів показано, що рекреаційне та пасторальне навантаження може супроводжуватися механічним руйнуванням підстилки, її переміщенням і змінами властивостей верхніх горизонтів ґрунту (Леневич та ін., 2014; Марискевич, Шпаківська, 2011). У межах Вододільно-Верховинського хребта подібний ефект найбільш виразно проявляється на окремих трансформованих ділянках, тоді як значна частина старовікових лісів зберігає природну структуру надходження і трансформації органічної речовини.

Ґрунтовий пул

На відміну від підстилки, ґрунтовий пул органічного Карбону характеризується більшою інерційністю та значно слабше реагує на сучасну вікову структуру деревостанів. У межах Вододільно-Верховинського хребта запаси ґрунтового Карбону формуються під впливом комплексу морфометричних і едафічних чинників. Вищі локальні значення переважно приурочені до ділянок із меншими ухілами та більшою потужністю ґрунтового профілю, тоді як на крутіших схилах із високою щербенистістю обсяг дрібнозему та можливості акумуляції органічної речовини є меншими.

Для лісових ґрунтів Сколівських Бескидів також характерний значний вплив морфологічних і фізичних властивостей профілю, водного режиму та антропогенного навантаження. Старовікові лісові екосистеми характеризуються добре збереженою структурою верхніх горизонтів, тоді як рекреаційне й пасторальне використання може спричиняти ущільнення ґрунту, зміни його пористості та водопроникності й, відповідно, умов накопичення та трансформації органічної речовини.

Порівняння ґрунтового пулу двох регіонів показує, що його величина значно менше визначається поточним віком деревостану, ніж запаси Карбону у фітомасі або підстилці. Більшого значення набувають потужність ґрунтового профілю, частка скелетного матеріалу, умови зволоження, інтенсивність ерозійних процесів та тривалість формування ґрунту під лісовою рослинністю.

Отже, порівняння Вододільно-Верховинського хребта зі Сколівськими Бескидами демонструє поєднання спільних загальнокарпатських закономірностей і регіональних особливостей акумуляції органічного Карбону. Подібні діапазони запасів у підстилці формуються за різного співвідношення вікових, орографічних та антропогенних чинників, тоді як ґрунтовий пул у обох регіонах значною мірою контролюється едафічними та морфометричними умовами. Це підтверджує, що регіональні відмінності в запасах Карбону визначаються не одним домінуючим фактором, а взаємодією структури деревостанів, рельєфу, ґрунтових властивостей та історії природокористування.

5.5.2. Польські Бескиди

Порівняння з Польськими Бескидами розширює аналіз на західну частину Карпатської гірської системи, де букові, ялицево-букові та мішані гірські ліси функціонують за подібних загальних природних умов, але відрізняються історією лісостористування, висотною диференціацією та структурою деревостанів. З огляду на методичні відмінності між дослідженнями зіставлення доцільно проводити окремо для основних пулів Карбону, враховуючи спосіб їх оцінювання.

Фітомаса

У межах Вододільно-Верховинського хребта запаси органічного Карбону у фітомасі характеризуються значною просторовою мінливістю. Без урахування ділянки суцільної рубки їх значення змінюються від 33,01 до 374,29 т·га⁻¹, а середнє становить $179,79 \pm 92,40$ т·га⁻¹. Найвищі значення характерні для старовікових букових і ялицево-букових деревостанів південного макросхилу.

Для лісів Польських Бескидів також характерна значна роль букових і ялицево-букових деревостанів у формуванні запасів живої біомаси. Проте безпосереднє зіставлення середніх величин потребує обережності через відмінності у віковій структурі вибірок, методах оцінювання біомаси та представленості природних і господарсько трансформованих лісів. Тому найбільш обґрунтованим є висновок про спільну закономірність: зі збільшенням частки старих і великорозмірних дерев зростає потенціал акумуляції Карбону у фітомасі.

Грубі деревні залишки

У межах Вододільно-Верховинського хребта запаси Карбону в змінюються в дуже широкому діапазоні — $0,86\text{--}85,60 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}$. Така варіабельність пов'язана з мозаїчною структурою старовікових лісів, локальним відмиранням дерев і куртин, вітровалами, буреломами та історією антропогенного впливу.

Для строго охоронюваних, природних і пралісових лісів Польщі *Wujoczek et al.* (2018) встановили середній об'єм мертвої деревини $172,0 \text{ м}^3\cdot\text{га}^{-1}$, а у гірських буково-ялицевих лісах — $223,9 \text{ м}^3\cdot\text{га}^{-1}$. Автори відзначають значну просторову мінливість та показують, що його кількість визначається не лише стадією розвитку деревостану, але й висотою над рівнем моря та інтенсивністю надходження нової мертвої деревини.

Через різні одиниці вимірювання пряме кількісне зіставлення цих результатів із запасами Карбону в Вододільно-Верховинського хребта є некоректним. Водночас обидва дослідження підтверджують спільну закономірність: у природних і старовікових гірських лісах характеризується високою просторовою мозаїчністю, а його локальні максимуми формуються переважно під впливом природної смертності та імпульсних порушень.

Ґрунтовий пул

У межах Вододільно-Верховинського хребта запаси органічного Карбону в ґрунті становлять $20,22\text{--}65,86 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}$ і не виявляють статистично значущої залежності від віку деревостанів. Їх просторову мінливість визначають насамперед потужність ґрунтового профілю, частка скелетного матеріалу, крутизна схилу та пов'язані з нею ерозійні процеси.

У *Beskid Żywiecki* запаси органічного Карбону в шарі ґрунту 0–20 см становлять $61,40\text{--}118,49 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}$ (*Staszal et al.*, 2021). Найвищі значення зафіксовано на висоті 1000 м н.р.м., тоді як на 1200 м вони знижувалися. Статистичний аналіз підтвердив значущий вплив висоти над рівнем моря на запаси Карбону, тоді як незалежного впливу експозиції схилу встановлено не було.

Вищі значення запасів Карбону у верхньому 20-сантиметровому шарі ґрунтів Польських Бескидів порівняно з дослідженими ґрунтами Вододільно-Верховинського хребта не можуть бути безпосередньо пов'язані з віком деревостанів.

Вони відображають сукупний вплив ґрунтових властивостей, щільності будови, вмісту органічної речовини, гідротермічного режиму та висотної диференціації. Додатковим чинником для Вододільно-Верховинського хребта є значна щербенистість окремих ґрунтів, яка зменшує об'єм дрібнозему на одиницю площі та відповідно потенційний запас органічного Карбону.

Отже, порівняння з Польськими Бескидами підтверджує спільні для гірських лісів Карпат закономірності: провідну роль структури деревостану у формуванні запасів Карбону у фітомасі, високу просторову мінливість та значну залежність ґрунтового пулу від едафічних і висотно-кліматичних умов. Водночас відмінності методичних підходів не дозволяють механічно ранжувати регіони за абсолютними величинами окремих пулів.

5.5.3. Словацькі Карпати

Старовікові букові ліси Словацьких Карпат є важливим референтним об'єктом для порівняння з лісовими екосистемами Вододільно-Верховинського хребта. Вони характеризуються тривалим природним розвитком, значними запасами деревини, наявністю мертвої деревини різних стадій розкладу та вираженою мозаїчністю структури деревостанів. Довготривалі дослідження семи старовікових букових резерватів північно-західних Карпат показали, що середній запас деревини в них становив $452\text{--}744 \text{ м}^3\cdot\text{га}^{-1}$, а середній об'єм мертвої деревини — $91\text{--}345 \text{ м}^3\cdot\text{га}^{-1}$. Водночас між окремими резерватами спостерігалася значна структурна мінливість, тоді як у межах одного масиву основні характеристики деревостану залишалися відносно стабільними протягом кількох десятиліть (Kucbel et al., 2012).

Така просторова неоднорідність добре узгоджується з результатами, отриманими для Вододільно-Верховинського хребта. В обох регіонах старовікові букові ліси характеризуються поєднанням значних запасів живої фітомаси з високою локальною мінливістю. Це свідчить, що мозаїчність запасів мертвої деревини є закономірною властивістю природної динаміки старовікових лісів, пов'язаною з відмиранням окремих дерев і куртин та чергуванням різних стадій розвитку деревостану.

Фітомаса та вікова структура

Сучасні дослідження старовікових букових і буково-домінованих лісів Карпат підтверджують, що значні запаси Карбону у фітомасі зберігаються і на пізніх стадіях розвитку деревостанів. За результатами аналізу 190 пробних площ старовікових букових лісів середній вік деревостанів становив близько 220 років, а середній запас Карбону у надземній живій і мертвій деревині — близько $230 \text{ т С} \cdot \text{га}^{-1}$ (Markuljaková et al., 2026).

Авторами встановлено позитивний зв'язок між віком деревостанів і запасами Карбону та не виявлено зменшення запасів із подальшим старінням лісу. Найважливішим структурним показником високих запасів Карбону була частка великих дерев діаметром понад 60 см. Це узгоджується з результатами, отриманими для Вододільно-Верховинського хребта, де найвищі запаси Карбону у фітомасі також характерні для старовікових деревостанів із значною часткою великорозмірних дерев.

Таким чином, порівняння зі старовіковими буковими лісами Словацьких Карпат підтверджує, що збільшення віку деревостану не супроводжується автоматичним припиненням акумуляції Карбону. Зі старінням лісу змінюються темпи його накопичення та співвідношення між живою фітомасою і детритними компонентами, однак великорозмірні дерева продовжують формувати значний довготривалий запас Карбону.

Ґрунтовий пул

Особливий інтерес становлять результати досліджень первинних букових лісів Badín і Dobroč у Словаччині, де запаси ґрунтового Карбону визначали методом кількісних ґрунтових розрізів до глибини 80 см із урахуванням кам'янистості профілю (Moktan et al., 2025). У комплексному дослідженні словацьких і румунських пралісів запаси Карбону в ґрунті становили $105\text{--}148 \text{ т С} \cdot \text{га}^{-1}$, тоді як у надземній біомасі — $291\text{--}391 \text{ т С} \cdot \text{га}^{-1}$.

Важливо, що 61–66 % загального запасу ґрунтового Карбону припадало на шар 20–80 см. Це демонструє значний внесок глибших горизонтів у довготривале зберігання Карбону та підтверджує необхідність врахування глибини дослідженого профілю при регіональних порівняннях.

Для Вододільно-Верховинського хребта абсолютні запаси ґрунтового Карбону є нижчими та становлять 20,22–65,86 т·га⁻¹. Безпосередньо інтерпретувати цю різницю як наслідок віку або природності деревостанів некоректно, оскільки величина ґрунтового пулу істотно залежить від потужності профілю, щільності будови, щербенистості, об'єму дрібнозему та методики розрахунку запасів. У ґрунтах досліджених ділянок Вододільно-Верховинського хребта значна скелетність і невелика потужність профілю на окремих схилах обмежують об'єм ґрунтового матеріалу, в якому може акумулюватися органічний Карбон.

Водночас результати для словацьких пралісових масивів підтверджують загальну закономірність: у старовікових лісах значні запаси Карбону формуються не лише у живій фітомасі, але й у ґрунтовому профілі, причому істотна їх частка може бути зосереджена нижче поверхневих горизонтів.

Отже, старовікові букові ліси Словацьких Карпат є близьким функціональним аналогом досліджених старовікових лісів Вододільно-Верховинського хребта. Для обох регіонів характерні значні запаси Карбону у фітомасі, висока просторова мінливість мертвої деревини та тривале збереження Карбону в ґрунтовому пулі. Відмінності абсолютних величин окремих пулів визначаються не лише віком деревостанів, але й структурою лісів, властивостями ґрунтового профілю та методичними особливостями оцінювання.

5.5.4. Румунські Карпати

Румунські Карпати використано як південнокарпатський регіональний контекст для оцінювання діапазону запасів органічного Карбону в природних і старовікових лісових екосистемах. На відміну від Сколівських Бескидів та Словацьких Карпат, це порівняння охоплює території з ширшим діапазоном абсолютних висот, кліматичних та едафічних умов і значною різноманітністю букових та мішаних гірських лісів.

Фітомаса і ґрунтовий пул

Особливо інформативними для порівняння є дані з первинних букових лісів Șinca та Izvoarele Nerei. У дослідженні Moktan et al. (2025), яке охоплювало пралісові масиви Словаччини та Румунії, запаси Карбону в надземній біомасі становили 291–

391 т С·га⁻¹, а в ґрунтовому профілі до глибини 80 см — 105–148 т С·га⁻¹. При цьому найвищі запаси ґрунтового Карбону серед досліджених масивів зафіксовано в румунському пралісі Șinca — близько 148 т С·га⁻¹.

Такі значення підтверджують здатність старовікових букових лісів Карпат одночасно формувати значні запаси Карбону як у живій фітомасі, так і в ґрунті. Водночас пряме кількісне зіставлення з Вододільно-Верховинським хребтом потребує врахування істотних відмінностей у потужності та щобенистості ґрунтового профілю, об'ємі дрібнозему та глибині його дослідження.

Для румунських пралісів характерний значний внесок глибших горизонтів у загальний ґрунтовий запас. У досліджених словацьких і румунських масивах на шар 20–80 см припадало 61–66 % Карбону всього 80-сантиметрового профілю (Moktan et al., 2025). Це ще раз підтверджує, що регіональні порівняння ґрунтового пулу мають проводитися лише з урахуванням глибини відбору та морфологічних властивостей ґрунтів.

Грубі деревні залишки

У природних лісах Румунських Карпат грубі деревні залишки є важливим компонентом трансформації органічної речовини. Дослідження Buezo et al. (2024) у пралісовому буковому лісі показало, що інтенсивність емісії CO₂ з поваленої деревини залежить від породи дерева, стадії розкладу, діаметра та локальних мікрокліматичних умов. Таким чином, функціонування як Карбонового пулу визначається не лише його кількістю, але й структурою мертвої деревини та умовами її розкладу.

Це узгоджується з результатами, отриманими для Вододільно-Верховинського хребта, де запаси Карбону в характеризуються найбільшою просторовою мінливістю серед досліджених пулів. В обох випадках мертва деревина є динамічним компонентом старовікової екосистеми, запаси та швидкість трансформації якого визначаються природною смертністю дерев, режимом локальних порушень, стадією розкладу та мікрокліматичними умовами.

Вплив режиму лісокористування

Моделльні дослідження лісів Національного парку Piatra Craiului показують, що режим лісокористування істотно впливає на довготривалу динаміку запасів деревини та Карбону. За результатами моделювання на 50-річний період сценарій без рубок забезпечував найбільше накопичення Карбону, тоді як збільшення інтенсивності вирубання деревини знижувало потенціал його акумуляції (Chivulescu et al., 2024).

Ці результати узгоджуються з встановленими для Вододільно-Верховинського хребта відмінностями між старовіковими лісами з тривалим природним розвитком і деревостанами, що зазнавали господарського впливу. Водночас вони не означають прямої тотожності між віком деревостану і величиною Карбонового запасу, оскільки останній визначається також продуктивністю, породним складом, структурою деревостану, ґрунтовими та кліматичними умовами.

Порівняння з Румунськими Карпатами підтверджує загальну для природних букових лісів Карпат закономірність — поєднання значних запасів Карбону у живій фітомасі з довготривалим його накопиченням у ґрунтовому профілі та постійним перерозподілом через пул мертвої деревини. Водночас широке варіювання цих запасів у різних частинах Карпат свідчить про суттєву роль регіональних едафічних, кліматичних та структурних особливостей лісових екосистем.

Отже, порівняння отриманих результатів із даними для інших регіонів Карпат показало, що запаси органічного Карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта загалом відповідають діапазнам, характерним для букових і мішаних лісів Карпатської гірської системи. Спільними закономірностями є провідна роль фітомаси у формуванні загального запасу Карбону, висока просторова мінливість, значна інерційність ґрунтового пулу та важливий внесок старовікової структури деревостанів у довготривале утримання Карбону. Водночас абсолютні величини окремих пулів істотно залежать від регіональних особливостей рельєфу, ґрунтового профілю, кліматичних умов, породного складу, історії природокористування та методичних підходів до їх оцінювання. Це підтверджує, що акумуляція Карбону в лісах Карпат визначається не одним універсальним чинником, а взаємодією структури деревостану з локальними едафічними, орографічними та кліматичними умовами.

Висновки до розділу 5

Обговорення отриманих результатів показало, що акумуляція органічного Карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта має чітко виражений багатофакторний характер і визначається взаємодією вікової структури деревостанів, природної динаміки лісів, експозиції макросхилів, рельєфу, ґрунтових умов та історії антропогенного впливу. Окремі пули Карбону по-різному реагують на дію цих чинників, що зумовлює їх функціональну диференціацію в межах лісової екосистеми.

Основним пулом органічного Карбону є фітомаса, частка якої становить 72 % загального запасу. Найвищі її значення характерні для старовікових деревостанів південного макросхилу, що підтверджує провідну роль віку та тривалості природного розвитку лісів у формуванні запасів живої біомаси. Ґрунтовий пул, який акумулює близько 14 % органічного Карбону, характеризується найбільшою інерційністю та стабільністю й значно слабше залежить від сучасної вікової структури деревостанів. Грубі деревні залишки формують близько 11 % запасів Карбону та відзначаються найбільшою просторовою варіабельністю, що пов'язано з мозаїчною динамікою деревостанів, природними та антропогенними порушеннями. Підстилка, частка якої становить близько 3 %, є найбільш динамічним пулом і швидко реагує на зміни структури деревостану та локальних екологічних умов.

Відмінності між північним і південним макросхилами найбільш виразно проявляються у запасах Карбону у фітомасі та підстилці. Південний макросхил характеризується переважанням старовікових деревостанів і більшими запасами Карбону в живій біомасі, тоді як на північному макросхилі значну частку становлять стиглі та пристигаючі ліси, що зазнавали інтенсивнішого господарського впливу. Водночас менш виразна диференціація ґрунтового пулу між макросхилами підтверджує його довготривалий та інерційний характер.

Установлено, що перехід від стиглого до старовікового стану деревостанів супроводжується не припиненням акумуляції Карбону, а зміною темпів і механізмів його накопичення та перерозподілу між пулами. У старовікових лісах поряд зі

значними запасами живої фітомаси зростає роль природного відмирання дерев, формування , безперервного надходження органічного опаду та подальшої трансформації органічної речовини в ґрунті.

Аналіз локальних екстремумів підтвердив, що навіть у межах старовікових лісів розподіл запасів органічного Карбону залишається просторово неоднорідним. Високі або низькі значення окремих пулів формуються внаслідок локального поєднання крутизни схилу, мікрорельєфу, потужності та щербенистості ґрунтового профілю, режиму зволоження, природних порушень і попереднього господарського впливу. Отже, старовікові ліси не є просторово однорідними системами, а характеризуються високою структурною та функціональною мозаїчністю.

Таким чином, старовікові ліси Вододільно-Верховинського хребта формують складну просторово неоднорідну систему акумуляції та трансформації органічного Карбону, в якій загальні закономірності визначаються віком і природністю деревостанів, а локальні відмінності — поєднанням біотичних, абіотичних та антропогенних чинників. Саме така взаємодія забезпечує різні механізми накопичення, перерозподілу та довготривалого утримання Карбону в окремих компонентах лісових екосистем.

Порівняння з іншими регіонами Карпат показало, що встановлені для Вододільно-Верховинського хребта закономірності загалом узгоджуються з особливостями акумуляції органічного Карбону в букових і мішаних лісах Карпатської гірської системи. Водночас відмінності абсолютних запасів окремих пулів визначаються регіональним поєднанням вікової та структурної організації деревостанів, ґрунтових, орографічних і кліматичних умов, історії природокористування, а також методичних підходів до їх оцінювання.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі узагальнено результати комплексного дослідження акумуляції органічного Карбону в основних компонентах старовікових лісових екосистем Вододільно-Верховинського хребта. На основі польових і лабораторних досліджень встановлено особливості його просторового розподілу у фітомасі, грубих деревних залишках, лісовій підстилці та ґрунті, а також визначено чинники, пов'язані з формуванням сумарного пулу органічного Карбону, що дало можливість сформулювати такі висновки:

1. Лісові екосистеми Вододільно-Верховинського хребта характеризуються значною неоднорідністю лісівничо-таксаційних показників, насамперед віку та породного складу деревостанів. Основу деревостанів формує бук лісовий, у мішаних насадженнях — за участю явора, ялини європейської та ялиці білої. Найстарші деревостани віком 150–200 років зосереджені переважно на південному макросхилі та представлені старовіковими буковими лісами, близькими за структурою до пралісових. Вік деревостанів статистично значуще відрізняється між північним і південним макросхилами ($z = 3,60$; $p = 3,1 \times 10^{-4}$). Формування запасів фітомаси тісно пов'язане з віковою структурою деревостанів, про що свідчить сильний позитивний зв'язок між запасами органічного Карбону у фітомасі та віком деревостану ($r_s = 0,88$; $p = 7,60 \times 10^{-9}$), а також об'ємом стовбурової фітомаси ($r_s = 0,80$).
2. Акумуляція органічного Карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта характеризується значною просторовою мінливістю. За результатами досліджень на 26 пробних площах сумарні запаси органічного Карбону у фітомасі, грубих деревних залишках, лісовій підстилці та ґрунті змінювалися від 65,83 до 468,01 т·га⁻¹ і в середньому становили 232,36 т·га⁻¹. Такий широкий діапазон значень відображає неоднорідність вікової та структурної організації деревостанів, умов місцезростання і ступеня природності досліджуваних лісових екосистем.
3. У структурі акумуляції органічного Карбону домінує фітомаса, на яку припадає близько 72% його сумарного запасу; частка ґрунтового пулу становить близько

14%, грубих деревних залишків — 11%, лісової підстилки — 3%. Середні запаси органічного Карбону у фітомасі становили $179,79 \pm 94,40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, у ґрунті — $33,93 \pm 9,36 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, у грубих деревних залишках — $26,12 \pm 27,38 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, у лісовій підстилці — $6,75 \pm 1,82 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Окремі пули характеризуються різною просторовою мінливістю та неоднаковою реакцією на вікову структуру деревостанів і умови місцезростання, що визначає їхню різну роль у формуванні сумарного карбонового пулу.

4. Просторові закономірності акумуляції органічного Карбону найбільш виразно проявляються у відмінностях між північним і південним макросхилами. Середній сумарний запас органічного Карбону на південному макросхилі становив $303,10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, тоді як на північному — $161,43 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$; відмінності характеризувалися великим стандартизованим розміром ефекту (d Коена = 1,85) та високим значенням коефіцієнта Баєса ($BF_{10} = 301$). Встановлено сильний позитивний зв'язок між сумарними запасами органічного Карбону та віком деревостану ($r = 0,88$; $p = 2,0 \times 10^{-9}$), а вік деревостанів статистично значуще відрізнявся між макросхилами ($z = 3,60$; $p = 3,1 \times 10^{-4}$). Отже, вікова та структурна зрілість деревостанів є одним із ключових чинників просторової диференціації акумуляції органічного Карбону на досліджуваній території.
5. Акумуляція органічного Карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта формується внаслідок комплексної взаємодії абіотичних, біотичних та антропогенних чинників. Серед абіотичних чинників найбільш виразно проявляється вплив крутизни схилу на ґрунтовий пул: зі збільшенням ухилу простежується тенденція до зменшення запасів органічного Карбону внаслідок посилення ерозійних процесів і площинного змиву. Серед біотичних чинників важливими є вік, породний склад і структурна організація деревостану, які визначають величину фітомаси, надходження рослинного опаду та формування мертвої деревини. Важливу функціональну роль у трансформації органічної речовини відіграє ґрунтова мезофауна: у досліджених угрупованнях значну частку становили сапрофаги, діяльність яких забезпечує фрагментацію рослинного детриту, його первинну трансформацію та

перерозподіл органічної речовини між підстилкою і ґрунтом, опосередковано впливаючи на процеси мінералізації, гуміфікації та стабілізації органічного Карбону. Антропогенне порушення структури лісу змінює співвідношення карбонових пулів: після суцільної рубки різко зменшується акумуляція Карбону у фітомасі та підстилці, тоді як тимчасово може зростати його запас у грубих деревних залишках. Отже, характер акумуляції органічного Карбону визначається взаємодією комплексу чинників, а окремі компоненти екосистеми характеризуються неоднаковою чутливістю до їхнього впливу.

6. Зміна режиму використання лісових екосистем визначає не лише величину, а й структуру акумульованого органічного Карбону. За умов господарської експлуатації найбільші втрати прогнозуються для пулу фітомаси, який формує близько 72% сумарних запасів Карбону. Наслідком вилучення деревостану є також порушення надходження рослинного опаду та зменшення акумуляції Карбону в підстилці. Це підтверджується даними ділянки після суцільної рубки, де зафіксовано лише $2,85 \pm 0,53 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ органічного Карбону в підстилці та $25,49 \pm 3,57 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ у ґрунті, тоді як у грубих деревних залишках тимчасово акумульовано $51,82 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ Карбону внаслідок залишення деревного матеріалу після рубки. Таким чином, на початковому етапі після експлуатації відбувається різке зменшення сумарного запасу та перерозподіл Карбону від живої фітомаси до коротко- і середньотривалих пулів мертвої органічної речовини.
7. За умов запровадження природоохоронного режиму прогнозується протилежна спрямованість змін: зі збільшенням віку та структурної зрілості деревостанів зростає акумуляція Карбону передусім у фітомасі, одночасно відновлюється безперервне надходження органічної речовини до підстилки та формування запасів мертвої деревини. Орієнтиром такого розвитку є старовікові ліси південного макросхилу, в яких середній сумарний запас органічного Карбону становить $303,10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ порівняно зі $161,43 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ у переважно стиглих і більш антропогенно трансформованих лісах північного макросхилу. Отже, збереження природної вікової структури та обмеження вилучення деревини

створюють умови для поступового відновлення сумарного карбонового пулу до рівнів, характерних для старовікових лісових екосистем.

Список використаних джерел

1. Альошкіна У. М., Жовтенко А. А., Вишенська І. Г., Расевич В. В., Гаврилов С. О., Ткачова А. О. Акумуляція вуглецю лісовими екосистемами (на прикладі модельних ділянок у заказнику «Лісники», м. Київ). Наукові записки НаУКМА. Біологія та екологія. 2011. Т. 119. С. 52–55.
2. Балюк С. А., Носко Б. С., Скрильник Є. В. Сучасні проблеми біологічної деградації чорноземів і способи збереження їх родючості. Вісник аграрної науки. 2016. Т. 94, № 1. С. 11–17. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201601-02>.
3. Бедернічек Т. Ю., Гамкало З. Г. Лабільна органічна речовина ґрунту: теорія, методологія, індикаторна роль. Київ : Кондор, 2014. 180 с. ISBN 978-966-2781-39-7.
4. Білоус А. М. Методика дослідження мортмаси лісів. Біоресурси і природокористування. 2014. Т. 6, № 3–4. С. 134–145.
5. Боголюбов В. М., Сальнікова А. В., Ракоїд О. О. Екологічний моніторинг : навч. посіб. / за ред. В. М. Боголюбова. Київ : НУБіП України, 2023. 200 с. ISBN 978-966-641-373-7.
6. Букові праліси та давні букові ліси Європи: проблеми збереження та сталого використання : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, Україна, м. Рахів, 16–22 вересня 2013 р. / відп. ред. Ф. Д. Гамор та ін. Ужгород : КП «Ужгородська міська друкарня», 2013. 378 с. ISBN 978-966-2921-89-2.
7. Василюшин Р. Д., Лакида І. П., Мельник О. М., Лакида М. О., Римаренко Ю. П. Органічний вуглець у рослинній біомасі лісів Київщини. Ukrainian Journal of Forest and Wood Science. 2021. Т. 12, № 3. С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.31548/forest2021.03.005>.
8. Волошин О. Р., Галайко Н. В. Економетрія. Ч. 1 : навч. посіб. Львів : Львівський державний університет внутрішніх справ, 2012. 192 с. ISBN 978-617-511-112-3.
9. Гамкало З. Г., Шпаківська І. М., Марискевич О. Г. Літогенний потенціал карбонізації педосфери: теоретико-методологічні, методичні та екосистемний

- підходи. Агрохімія і ґрунтознавство. 2021. Вип. 92. С. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.31073/acss92-05>.
10. Гамкало З. Г., Шпаківська І. М., Марискевич О. Г. Оцінка потенціалу стабілізації сполук карбону в ґрунті: теоретико-методичні підходи. Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2021 : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 29–30 квітня 2021 р. Харків, 2021. С. 29–32.
 11. Геренчук К. І. Природа Львівської області. Львів : Вища школа, 1972. 256 с.
 12. Голубець М. А., Гнатів П. С., Крок Б. О. Рослинний покрив. Концептуальні засади сталого розвитку гірського регіону. Львів : Поллі, 2007. С. 85–93.
 13. Гончар Г. Ю. Біоекологічні особливості диких бджіл (Hymenoptera: Apoidea) в умовах антропогенно змінених територій : дис. ... канд. біол. наук : 03.00.16 «Екологія» / ДУ «Інститут еволюційної екології НАН України» ; Інститут екології Карпат НАН України. Київ, 2021. 246 с.
 14. Горошко М. П., Портах С. В. Об'ємна структура стовбурів ялиці білої у модальних лісових насадженнях Українських Карпат: порівняльний аналіз. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2014. Вип. 12. С. 120–125.
 15. Екологічна складова національної безпеки: основні показники і шляхи їх досягнення : аналіт. доп. Київ : Національний інститут стратегічних досліджень, 2013. 34 с.
 16. Екологічний потенціал наземних екосистем / М. А. Голубець, О. Г. Марискевич, Б. О. Крок та ін. Львів : Поллі, 2003. 180 с.
 17. Задорожний А. І. Структура надземної фітомаси букових і ялинових деревостанів Полонинського хребта Українських Карпат : автореф. дис. ... канд. с.-г. наук : 06.03.02 «Лісовпорядкування і лісова таксація». Львів : Національний лісотехнічний університет України, 2021.
 18. Клімат. Національний природний парк «Сколівські Бескиди». URL: <https://skole.org.ua/klimat.html> (дата звернення: 09.07.2026).
 19. Козак І. І., Парпан Т. В., Коцюба П. Г., Козак Г. Г., Стемпень А. А. Аналіз змін фітомаси деревостанів у лісових насадженнях міста Любліна з використанням

- моделі FORKOME. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2015. Вип. 13. С. 70–75. DOI: 10.15421/411509.
20. Кравчук Я. С. Геоморфологія Полонинсько-Чорногірських Карпат. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2008. 188 с.
 21. Кравчук Я. С. Геоморфологія Скибових Карпат. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2005. 232 с.
 22. Кравчук Я. С. Морфоструктурно-морфоскульптурний аналіз рельєфу Вододільно-Верховинських Карпат. Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій. 2017. Вип. 1 (7). С. 26–49.
 23. Кравчук Я. С. Рельєф Українських Карпат : монографія. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2021. 576 с.
 24. Криницький Г. Т., Чернявський М. В., Дербаль Ю. Ю. та ін. Наближене до природи та багатофункціональне ведення лісового господарства в Карпатському регіоні України та Словаччини. Ужгород : ПП «Коло», 2014. 320 с. ISBN 978-617-642-172-6.
 25. Криницький Г., Третяк П. Стан лісів Українських Карпат, екологічні проблеми та перспективи. Праці Наукового товариства ім. Шевченка. 2003. Т. XII. С. 54–65.
 26. Критерії та методика ідентифікації пралісів і старовікових лісів (квазі-пралісів) / за ред. Р. Волосянчука, Б. Проця, О. Кагала. 2-ге вид., доповн. Львів : Ліга-Прес, 2017. 36 с. ISBN 978-617-3971-40-7.
 27. Лабораторний практикум «Статистичний аналіз SPSS». Львів : Львівський національний університет імені Івана Франка, 2020. 126 с.
 28. Лакида П. І. Фітомаса лісів України : монографія. Тернопіль : Збруч, 2002. 256 с.
 29. Лакида П. І., Володимиренко В. М. Штучні ялинові деревостани Українських Карпат: прогноз росту та продуктивності : монографія. Київ : ННЦ «Інститут аграрної економіки», 2008. 158 с. ISBN 978-966-669-236-4.

- 30.Лакида П. І., Сендзюк Р. В., Морозюк О. В. Ліси Полтавщини: біопродуктивність і динаміка : монографія. Корсунь-Шевченківський : Майдаченко І. С., 2011. 219 с.
- 31.Лакида П. І., Швиденко А. З., Щепашенко Д. Г. та ін. Біотична продуктивність лісів України в європейському екоресурсному вимірі. Біоресурси і природокористування. 2013. Т. 5, № 5–6. С. 99–106.
- 32.Лелека Д., Шпаківська І., Пижик І. Запаси органічного карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта (Українські Карпати). Біорізноманіття, екологія та експериментальна біологія. 2024. Т. 26, № 2. С. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.34142/2708-5848.2024.26.2.02>.
- 33.Леневич О. І., Марискевич О. Г., Шпаківська І. М. Оцінка впливу лінійної форми рекреації на властивості бурих гірсько-лісових ґрунтів. Наукові записки Державного природознавчого музею. 2020. Вип. 36. С. 61–68. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001190988>.
- 34.Леневич О., Паньків З. Екологічний потенціал ґрунтів старовікових природних лісів Сколівських Бескид (Українські Карпати). Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій. 2024. Вип. 2 (17). С. 130–147. DOI: <https://doi.org/10.30970/gpc.2024.2.4562>.
- 35.Ліси природно-заповідних територій в умовах глобальних змін : матеріали міжнародної науково-практичної конференції з нагоди 25-ї річниці Національного природного парку «Сколівські Бескиди» (Сколе–Львів, 5 липня 2024 року). Сколе, 2024. 329 с.
- 36.Максименко Н. В., Бурченко С. В., Шпаківська І. М., Кротько А. С. Оцінка вуглецевої ємності монопородних деревостанів – елементів зеленої інфраструктури м. Харків. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2022. Вип. 38. С. 73–84. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-07>.
- 37.Маленко Я. В., Ворошилова Н. В., Перерва В. В., Поздній Є. В. Основи екології : практикум. Кривий Ріг : КДПУ, 2023. 197 с.
- 38.Мармоза А. Т. Теорія статистики : підручник. 2-ге вид., перероб. та доповн. Київ : Центр учбової літератури, 2013. 592 с. ISBN 978-617-673-163-4.

39. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна програма збереження торфовищ. 2023. URL: <https://mepr.gov.ua/news/>.
40. Моніторинг динаміки вуглецевих потоків у лісових екосистемах. 2022. URL: <http://www.iecarpath.org/>.
41. Одум Ю. Экология : в 2 т. Т. 1 / пер. с англ. Москва : Мир, 1986. 328 с. URL: <https://archive.org/details/ecology00odum>.
42. Олійник В. С. Водоохоронно-захисна роль гірських лісів Українських Карпат, їх антропогенні зміни та шляхи оптимізації : автореф. дис. ... д-ра с.-г. наук. Львів, 2008. 40 с.
43. Пастернак В. П. Біопродуктивність лісів північного сходу України в контексті змін клімату : автореф. дис. ... д-ра с.-г. наук : 06.03.02 «Лісовпорядкування та лісова таксація», 06.03.03 «Лісознавство і лісівництво» / Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2011. 41 с.
44. Пижик І. С., Шпаківська І. М. Актуальні запаси органічного карбону у лісових екосистемах регіонального ландшафтного парку «Надсянський» (МРБ «Східні Карпати»). Actual problems of natural sciences : collective monograph. Riga : Baltija Publishing, 2020. С. 241–263. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-025-4-12>.
45. Пижик І. С., Шпаківська І. М. Актуальні запаси органічного карбону в мортмасі та ґрунті лісових екосистем Стрийсько-Сянської Верховини на території Верхньовисоцького лісництва (ДП «Боринський лісгосп»). Науковий вісник НЛТУ України. 2019. Т. 29, № 9. С. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.36930/40290902>.
46. Пижик І. С., Шпаківська І. М. Запаси органічного вуглецю в мортмасі лісових екосистем регіонального ландшафтного парку «Надсянський» (Українські Карпати). Біологія та валеологія. 2018. Вип. 20. С. 15–21.
47. Пижик І. С., Шпаківська І. М., Марискевич О. Г., Рожак В. П., Дичкевич В. М., Пука Є. О. Особливості формування і оцінка запасів органічного карбону в лісових екосистемах регіонального ландшафтного парку «Надсянський» як складової частини МРБ «Східні Карпати» : монографія / за ред. О. Г. Марискевич. Львів : Простір-М, 2022. 112 с. ISBN 978-966-02-9947-4.

- 48.Позняк С. П., Гнатишин М. А. Глобальна ініціатива «4 per 1000» та можливості її реалізації в Україні. Український географічний журнал. 2021. № 2 (112). С. 11–19. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2021.02.011>.
- 49.Портянник С. В. Використання регресійного аналізу в моделюванні екологічної ситуації за допомогою прогнозування переходу токсичних важких металів з кормів раціону дійних корів в органічні відходи й акумуляції поллютантів у ґрунті сільськогосподарських скотарських підприємств. Український журнал природничих наук. 2024. № 7. С. 210–228. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.23>.
- 50.Портянник С. В., Маменко О. М., Кондратенко О. М. Кореляційний аналіз вмісту важких металів у кормах та органічних відходах тваринництва з оцінкою екологічного ризику забруднення агроєкосистем поллютантами. Техногенно-екологічна безпека. 2025. Т. 17, № 1. С. 81–91. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2025.1.9>.
- 51.Природа Закарпатської області / за ред. К. І. Геренчука. Львів : Вища школа, 1981. 156 с.
- 52.Природні ліси Українських Карпат / ред. А. Смалійчук, У. Гребенер. Львів : Карти і Атласи, 2018. 104 с.
- 53.Районування Карпат. Природничий часопис. 2010. № 1. С. 5–20.
- 54.Рожак В. П. Пули і потоки вуглецю в лісових екосистемах Стрийсько-Сянської Верховини (Українські Карпати). Біологія та валеологія. 2014. Вип. 16. С. 85–95.
- 55.Рожак В. П. Цикл вуглецю в лісових екосистемах Стрийсько-Сянської Верховини (Українські Карпати) : дис. ... канд. біол. наук / Інститут екології Карпат НАН України. Львів, 2015. 198 с.
- 56.Рожак В. П., Козловський В. І. Запаси й елементний склад опаду та підстилки в лісових екосистемах Стрийсько-Сянської Верховини (Українські Карпати). Вісник Львівського університету. Серія біологічна. 2013. Вип. 62. С. 160–169.
- 57.Рожак В. П., Шпаківська І. М., Папіш М. І. Запаси та структура грубих деревних залишків та їх роль у формуванні резервуару органічного карбону в лісових

- екосистемах Карпатського НПП. Наукові основи збереження біотичної різноманітності. 2017. Т. 8 (15), № 1. С. 83–96.
58. Рудишин С. Д. Біогеохімія з основами екології : навч. посіб. Дніпро : Середняк Т. К., 2023. 320 с. ISBN 978-917-8245-38-2.
59. Сливка Р. О. Геоморфологія Вододільно-Верховинських Карпат. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2001. 151 с.
60. Стойко С. М. Причини катастрофічних паводків у Закарпатті та система екологічних профілактичних заходів їх попередження. Український ботанічний журнал. 2000. Т. 57, № 1. С. 23–24.
61. Стойко С. М. Система екологічних заходів із запобігання повеням в Українських Карпатах. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2011. № 5. С. 91–99.
62. Стрямець О., Стрямець С. Моделювання фітомаси лісів Підкарпатського воєводства засобами ГІС. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології. 2013. № 751. С. 231–236.
63. Тарасова В. В. Екологічна статистика (з блочно-модульною формою контролю знань) : підручник. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 397 с.
64. Токар О. Є. Інформаційна технологія дослідження стоку вуглецю в лісових екосистемах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 «Інформаційні технології» / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2015. 20 с.
65. Токар О. Є., Король М. М., Густі М. І. Оцінювання запасів вуглецю у фітомасі лісових насаджень заповідних територій Українських Карпат. Науковий вісник НЛТУ України. 2021. Т. 31, № 5. С. 42–46. DOI: <https://doi.org/10.36930/40310506>.
66. Хом'як І. В. Екосистемологія : навч. посіб. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2022. 235 с. URL: <https://eprints.zu.edu.ua/34080/>.

- 67.Черневий Ю. І., Третяк П. Р. Приріст старовікових деревостанів та його екологічне значення. Науковий вісник НЛТУ України. 2010. Вип. 20.9. С. 70–77.
- 68.Черневий Ю. І., Третяк П. Р. Приріст старовікових деревостанів та його екологічне значення. Науковий вісник НЛТУ України. 2010. Вип. 20.9. С. 70–77.
- 69.Чернявська Х. І., Шпаківська І. М. Запас карбону в лісовій підстилці на території Сколівських Бескидів (Українські Карпати). Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2022. Вип. 37. С. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-37-08>.
- 70.Чорнобай Ю. Екологічні сукцесії детриту в гірських лісових екосистемах. Праці Наукового товариства ім. Шевченка. Т. VII. Екологічний збірник. Львів : НТШ, 2001. С. 117–128.
- 71.Чорнобай Ю. М. Трансформація рослинного детриту в природних екосистемах. Львів : Вид-во ДПМ НАН України, 2000. 352 с.
- 72.Чорнобай Ю. М., Марискевич О. Г. Органічний склад підстилок у фітоценозах Українських Карпат. Український ботанічний журнал. 1992. Т. 49, № 3. С. 20–25.
- 73.Шаблій О. І., Муха Б. П., Гурин А. В., Зінкевич М. В. Географія: Львівська область. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 1998. 300 с.
- 74.Швиденко А. З., Лакида П. І., Щепашенко Д. Г., Василюшин Р. Д., Марчук Ю. М. Вуглець, клімат та землеуправління в Україні: лісовий сектор : монографія. Корсунь-Шевченківський : ФОП Гаврищенко В. М., 2014. 283 с.
- 75.Шпаківська І. М., Марискевич О. Г. Оцінка запасів органічного вуглецю в лісових екосистемах Східних Бескидів. Лісівництво і агролісомеліорація. 2009. Вип. 115. С. 176–180.
- 76.Шпаківська І. М., Рожак В. П. Особливості формування запасів фітомаси лісових екосистем Стрийсько-Сянської Верховини (Українські Карпати). Науковий вісник НЛТУ України. 2013. Вип. 23.18. С. 9–17.

77. Яворницький В. І. Різноманіття та особливості формування угруповань ґрунтових безхребетних (мезофауна, мікроартроподи) у дібровах рівнинної частини верхів'я басейну Дністра. Наукові основи збереження біотичної різноманітності. 2010. Т. 1 (8), № 1. С. 247–276.
78. Achasova A., Achasov A., Titenko G., Krivtsov V. Some Approaches to Measuring Soil's Carbon Sequestration Potential in Ukraine. Proceedings of the 5th International Scientific Congress Society of Ambient Intelligence (ISC SAI 2022): Sustainable Development and Global Climate Change. 2022. P. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.5220/0011341000003350>.
79. Aloschkina U. M., Kozlovskiy V. A., Petrenko Y. S. Акумуляція вуглецю лісовими екосистемами. Харків : Вид-во ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2011. 135 с.
80. Arcuri A., Briand L. A Hitchhiker's Guide to Statistical Tests for Assessing Randomized Algorithms in Software Engineering. Software Testing, Verification & Reliability. 2014. Vol. 24, No. 3. P. 219–250. DOI: <https://doi.org/10.1002/stvr.1486>.
81. Berner R. A. The Phanerozoic Carbon Cycle: CO₂ and O₂. New York : Oxford University Press, 2004. 159 p. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195173338.001.0001>.
82. Blavascunas E. Foresters, Borders, and Bark Beetles: The Future of Europe's Last Primeval Forest. Bloomington : Indiana University Press, 2020.
83. Bobiec A., Gutowski J. M., Zub K., Pawlaczyk P., Laudenslayer W. F. The Afterlife of a Tree. Warszawa–Hajnówka : WWF Poland, 2005. 252 p. ISBN 83-920712-1-2.
84. Bono A., Alberti G., Berretti R. et al. The largest European forest carbon stocks are in the Dinaric Alps old-growth forests: comparison of direct measurements and standardized approaches. Carbon Balance and Management. 2024. Vol. 19. Art. 15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-024-00262-4>.
85. Boyle R. The Sceptical Chymist. London : J. Cadwell, 1661. URL: <https://archive.org/details/scepticalchymist00boyl>.
86. Brandão M., Levasseur A., Kirschbaum M. U. F. et al. Key issues and options in accounting for carbon sequestration and temporary storage in life cycle assessment

- and carbon footprinting. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2013. Vol. 18. P. 230–240. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0451-6>.
87. Buezo J., Medina N. G., Hereş A. M., Petrişan I. C., Cornelissen J. H. C., Petrişan A. M., Esteban R., Ilinca E., Stoian R., Curiel Yuste J. Downed woody debris carbon emissions in a European temperate virgin forest as driven by species, decay classes, diameter and microclimate. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 912. Art. 169133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169133>.
88. Bujoczek L., Szewczyk J., Bujoczek M. Deadwood volume in strictly protected, natural, and primeval forests in Poland. *European Journal of Forest Research*. 2018. Vol. 137, No. 3. P. 401–418. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1124-1>.
89. Canadell J. G., Le Quéré C., Raupach M. R. et al. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2007. Vol. 104, No. 47. P. 18866–18870. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0702737104>.
90. Chivulescu S., Radu R. G., Capalb F., Hapa M., Pitar D., Marmureanu L., Leca S., Petrea S., Badea O. Cost valuation and climate mitigation impacts of forest management: a case study from Piatra Craiului National Park, Romania. *Land*. 2024. Vol. 13, No. 1. Art. 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13010017>.
91. Coffelt D., Hendrickson C. *Fundamentals of Infrastructure Management*. Pittsburgh, PA, 2017. 210 p. DOI: <https://doi.org/10.1184/R1/5334379.v1>.
92. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2nd ed. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 1988. 567 p. ISBN 0-8058-0283-5.
93. Copoş O., Tănase C. Substrate properties, forest structure and climate influences wood-inhabiting fungal diversity in broadleaved and mixed forests from Northeastern Romania. *Forest Systems*. 2020. Vol. 29, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.5424/fs/2020293-16728>.
94. Crawley M. J. *The R Book*. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2013. 1076 p.
95. Crowther T. W., Todd-Brown K. E. O., Rowe C. W. et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*. 2016. Vol. 540, No. 7631. P. 104–108. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature20150>.

96. Derrick B., Toher D., White P. Why Welch's test is Type I error robust. *The Quantitative Methods for Psychology*. 2016. Vol. 12, No. 1. P. 30–38. DOI: <https://doi.org/10.20982/tqmp.12.1.p030>.
97. DeVries T., Primeau F., Deutsch C. The sequestration efficiency of the biological pump. *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39. Art. L13601. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012GL051963>.
98. Di Sacco A., Hardwick K. A., Blakesley D. et al. Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits. *Global Change Biology*. 2021. Vol. 27. P. 1328–1348. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15498>.
99. Dunger W., Fiedler H. J. *Methoden der Bodenbiologie*. Stuttgart ; New York : Gustav Fischer Verlag, 1989. 432 S.
100. Egan A. R., Keeton W. S., Danks C. M., Soloviy I., Zia A. Forest carbon projects in the Ukrainian Carpathians: an assessment of potential community impacts and benefits. *Annals of Forest Research*. 2017. Vol. 60, No. 1. P. 3–17. DOI: <https://doi.org/10.15287/afr.2016.718>.
101. European Environment Agency. European Climate Adaptation Platform (Climate-ADAPT). URL: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>.
102. Falkowski P., Scholes R. J., Boyle E. et al. The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system. *Science*. 2000. Vol. 290, No. 5490. P. 291–296. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.290.5490.291>.
103. FAO. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Rome : FAO, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca9825en>.
104. FAO. *World Soil Day 2022: FAO publishes first global report on black soils*. 2022. URL: <https://www.fao.org/newsroom/detail/world-soil-day-2022-fao-global-report-black-soils/en>.
105. Fieberg J. *Statistics for Ecologists: A Frequentist and Bayesian Treatment of Modern Regression Models*. Minneapolis : University of Minnesota Libraries Publishing, 2024. 571 p. DOI: <https://doi.org/10.24926/9781959870029>. ISBN 978-1-959870-02-9.

106. Field A. *Discovering Statistics Using SPSS (and Sex and Drugs and Rock 'n' Roll)*. 3rd ed. London : SAGE Publications, 2009. 821 p. ISBN 978-1-84787-906-6.
107. Fulk G. Descriptive Statistics, An Important First Step. *Journal of Neurologic Physical Therapy*. 2023. Vol. 47, No. 2. P. 63. DOI: <https://doi.org/10.1097/NPT.0000000000000434>.
108. Galloway J. N., Dentener F. J., Capone D. G. et al. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*. 2004. Vol. 70, No. 2. P. 153–226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>.
109. Gattuso J.-P., Magnan A. K., Bopp L. et al. Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*. 2021. Vol. 13. P. 179–199. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-032020-015009>.
110. Gelman A., Hill J., Vehtari A. *Regression and Other Stories*. Cambridge : Cambridge University Press, 2020. 552 p. ISBN 978-1-108-49698-1.
111. Ghasemi A., Zahediasl S. Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *International Journal of Endocrinology and Metabolism*. 2012. Vol. 10, No. 2. P. 486–489. DOI: <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>.
112. Graven H., Keeling R. F., Rogelj J. Changes to carbon isotopes in atmospheric CO₂ over the industrial era and into the future. *Global Biogeochemical Cycles*. 2020. Vol. 34, No. 11. Art. e2019GB006170. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GB006170>.
113. Grissom R. J., Kim J. J. *Effect Sizes for Research: Univariate and Multivariate Applications*. 2nd ed. New York : Routledge, 2012. 460 p. ISBN 978-0-415-87768-8.
114. Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. *PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis*. *Palaeontologia Electronica*. 2001. Vol. 4, No. 1. Art. 4. 9 p.
115. Heimann M., Reichstein M. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature*. 2008. Vol. 451. P. 289–292. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature06591>.

116. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
117. Jacoby W. G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables. Electoral Studies. 2000. Vol. 19, No. 4. P. 577–613. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(99\)00028-1](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(99)00028-1).
118. Jain A. K., Ross A. A., Nandakumar K. Introduction to Biometrics. New York : Springer, 2011. 443 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-77326-1>. ISBN 978-0-387-77325-4.
119. Joshi R., Singh H. Carbon sequestration potential of disturbed and non-disturbed forest ecosystem: a tool for mitigating climate change. African Journal of Environmental Science and Technology. 2020. Vol. 14, No. 11. P. 385–393. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJEST2020.2920>.
120. Jurasinski G., Jordan A., Glatzel S. Mapping soil CO₂ efflux in an old-growth forest using regression kriging with estimated fine root biomass as ancillary data. Forest Ecology and Management. 2012. Vol. 263. P. 101–113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.025>.
121. Kass R. E., Raftery A. E. Bayes Factors. Journal of the American Statistical Association. 1995. Vol. 90, No. 430. P. 773–795. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1995.10476572>.
122. Keith A. M., Henrys P. A., Rowe R. L., McNamara N. P. Technical note: A bootstrapped LOESS regression approach for comparing soil depth profiles. Biogeosciences. 2016. Vol. 13. P. 3863–3868. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-13-3863-2016>.
123. Konôpka B., Šebeň V., Pajtík J. Species Composition and Carbon Stock of Tree Cover at a Postdisturbance Area in Tatra National Park, Western Carpathians. Mountain Research and Development. 2019. Vol. 39, No. 1. P. 71–80. DOI: <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00008.1>.

124. Konôpka B., Šebeň V., Pajtík J. Species Composition and Carbon Stock of Tree Cover at a Postdisturbance Area in Tatra National Park, Western Carpathians. *Mountain Research and Development*. 2019. Vol. 39, No. 1. P. R71–R80. DOI: <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00008.1>.
125. Kucbel S., Saniga M., Jaloviar P., Vencurik J. Stand structure and temporal variability in old-growth beech-dominated forests of the northwestern Carpathians: A 40-years perspective. *Forest Ecology and Management*. 2012. Vol. 264. P. 125–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.10.011>.
126. Labaz B., Gałka B., Bogacz A., Waroszewski J., Kabala C. Factors influencing humus forms and forest litter properties in the mid-mountains under temperate climate of southwestern Poland. *Geoderma*. 2014. Vol. 230–231. P. 265–273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.021>.
127. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*. 2004. Vol. 304, No. 5677. P. 1623–1627. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1097396>.
128. Lavoisier A. *Traité élémentaire de chimie*. Paris : Cuchet, 1789. URL: https://archive.org/details/b28777050_0003/page/n5/mode/2up.
129. Le Quéré C., Andrew R. M., Friedlingstein P. et al. Global Carbon Budget 2017. *Earth System Science Data*. 2018. Vol. 10, No. 1. P. 405–448. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>.
130. Lee M. D., Wagenmakers E.-J. *Bayesian Cognitive Modeling: A Practical Course*. Cambridge : Cambridge University Press, 2014. 280 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139087759>.
131. Lee S., Lee S., Shin J. et al. Assessing the Carbon Storage of Soil and Litter from National Forest Inventory Data in South Korea. *Forests*. 2020. Vol. 11, No. 12. Art. 1318. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11121318>.
132. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. 2015. Vol. 528. P. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16069>.
133. Lesiv M., Shvidenko A., Schepaschenko D., See L., Fritz S. A spatial assessment of the forest carbon budget for Ukraine. *Mitigation and Adaptation*

- Strategies for Global Change. 2019. Vol. 24. P. 985–1006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9795-y>.
134. Leys C., Ley C., Klein O., Bernard P., Licata L. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*. 2013. Vol. 49, No. 4. P. 764–766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013>.
 135. Liebig J. *Organic Chemistry in its Applications to Agriculture and Physiology*. London : Taylor and Walton, 1840. URL: <https://archive.org/details/chemistryinitsa02liebgoog/page/n5/mode/2up>.
 136. Mangiafico S. S. *Summary and Analysis of Extension Program Evaluation in R*. Version 1.24.4. New Brunswick, NJ : Rutgers Cooperative Extension, 2016.
 137. Markuljaková K., Svitok M., Mikoláš M. et al. Old-growth mixed beech-dominated forests continue accumulating carbon with advancing age. *Forest Ecosystems*. 2026. Vol. 15, No. 1. Art. 100411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2025.100411>.
 138. Masuda N. Detecting and forecasting tipping points from sample variance alone. *PNAS Nexus*. 2026. Vol. 5, No. 4. Art. pgag126. DOI: <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgag126>.
 139. McDonald J. H. *Handbook of Biological Statistics*. 3rd ed. Baltimore : Sparky House Publishing, 2014.
 140. Moinet G. Y. K., Amundson R., Galdos M. V. et al. Climate change mitigation through soil carbon sequestration in working lands: A reality check. *Global Change Biology*. 2024. Vol. 30, No. 1. Art. e17010. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17010>.
 141. Moktan L., Hofmeister J., Oulehle F. et al. Not only aboveground biomass: Soil of undisturbed Carpathian beech forests also stores substantial carbon. *Forest Ecology and Management*. 2025. Vol. 597. Art. 123140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123140>.
 142. Morrissey R. C., Jenkins M. A., Saunders M. R. Accumulation and Connectivity of Coarse Woody Debris in Partial Harvest and Unmanaged Relict

- Forests. PLoS ONE. 2014. Vol. 9, No. 11. Art. e113323. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113323>.
143. Nakagawa S., Cuthill I. C. Effect size, confidence interval and statistical significance: a practical guide for biologists. *Biological Reviews*. 2007. Vol. 82, No. 4. P. 591–605. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-185X.2007.00027.x>.
 144. Nunes L. J. R., Meireles C. I. R., Gomes C. J. P., Ribeiro N. M. C. A. Forest Contribution to Climate Change Mitigation: Management Oriented to Carbon Capture and Storage. *Climate*. 2020. Vol. 8, No. 2. Art. 21. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli8020021>.
 145. Ouachene N., Senga Kiessé T., Corson M. S. Using conditional Kendall's tau estimation to assess interactions among variables in dairy-cattle systems. *Agricultural Systems*. 2024. Vol. 220. Art. 104089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.104089>.
 146. Paltineanu C., Domnariu H., Mocanu V., Dumitru S. Assessing soils' health by using soil organic carbon (SOC) content, SOC/clay ratio and mean SOC reference values: a case study on Romanian mineral soils. *The Journal of Agricultural Science*. 2025. Vol. 163, No. 3. P. 307–319. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0021859625000280>.
 147. Paltineanu C., Dumitru S., Vizitiu O., Mocanu V., Lăcătușu A.-R., Ion S., Domnariu H. Soil organic carbon and total nitrogen stocks related to land use and basic environmental properties – assessment of soil carbon sequestration potential in different ecosystems. *Catena*. 2024. Vol. 246. Art. 108435. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108435>.
 148. Pan Y., Birdsey R. A., Fang J. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. 2011. Vol. 333, No. 6045. P. 988–993. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1201609>.
 149. Plisko I., Kudin V., Bate B., Bezzub N. Creation of a national map of organic carbon stocks in the soils of Ukraine. *Agrochemistry and Soil Science*. 2018. Vol. 87. P. 57–62. DOI: <https://doi.org/10.31073/acss87-09>.

150. Poldrack R. A. Statistical Thinking for the 21st Century. 2019. URL: <https://statsthinking21.org/>.
151. Reimann C., Filzmoser P. Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*. 2000. Vol. 39, No. 9. P. 1001–1014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s002549900081>.
152. Rizun V., Novikov A., Hushtan K. et al. Rare component of biota in the Data Centre “Biodiversity of Ukraine” and its possible use to identify hotspot areas and evaluation of biodiversity. *Biosystems Diversity*. 2024. Vol. 32, No. 3. P. 334–344. DOI: <https://doi.org/10.15421/012436>.
153. Russell M. B., Fraver S., Aakala T. et al. Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood: a review. *Forest Ecology and Management*. 2015. Vol. 350. P. 107–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.033>.
154. Santos R. M. B., Sanches Fernandes L. F., Cortes R. M. V., Pacheco F. A. L. Hydrologic Impacts of Land Use Changes in the Sabor River Basin: A Historical View and Future Perspectives. *Water*. 2019. Vol. 11, No. 7. Art. 1464. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11071464>.
155. Schlesinger W. H., Bernhardt E. S. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. 3rd ed. Waltham, MA : Academic Press, 2013. 688 p.
156. Schmidt M. W. I., Torn M. S., Abiven S. et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*. 2011. Vol. 478. P. 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10386>.
157. Sierra C. A., Ahrens B., Bolinder M. A. et al. Carbon sequestration in the subsoil and the time required to stabilize carbon for climate change mitigation. *Global Change Biology*. 2024. Vol. 30, No. 1. Art. e17153. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17153>.
158. Smith P., House J. I., Bustamante M. et al. Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*. 2016. Vol. 22, No. 3. P. 1008–1028. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13068>.

159. Sokal R. R., Rohlf F. J. Biometry: The Principles and Practice of Statistics in Biological Research. 3rd ed. New York : W. H. Freeman and Company, 1995. 887 p. ISBN 0-7167-2411-1.
160. Sosa V. J., Negrete-Yankelevich S., Fox G. A. Introduction. Ecological Statistics: Contemporary Theory and Application / ed. by G. A. Fox, S. Negrete-Yankelevich, V. J. Sosa. Oxford : Oxford University Press, 2015. P. 1–14.
161. Staszek K., Błońska E., Lasota J. Slope aspect and altitude effect on selected soil organic matter characteristics in Beskid Mountains forest soils. Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry. 2021. Vol. 63, No. 3. P. 214–224. DOI: <https://doi.org/10.2478/ffp-2021-0022>.
162. Steel E. A., Kennedy M. C., Cunningham P. G., Stanovick J. S. Applied statistics in ecology: common pitfalls and simple solutions. Ecosphere. 2013. Vol. 4, No. 9. Art. 115. DOI: <https://doi.org/10.1890/ES13-00160.1>.
163. Steffen W., Rockström J., Richardson K. et al. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. Vol. 115, No. 33. P. 8252–8259. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>.
164. Stöcker G., Bergmann A. Ein Modell der Dominanzstruktur und seine Anwendung. 1. Modellbildung, Modellrealisierung, Dominanzklassen. Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung. 1977. Vol. 17, No. 1. S. 1–26.
165. Trumbore S. Radiocarbon and soil carbon dynamics. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2009. Vol. 37. P. 47–66. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.36.031207.124300>.
166. United Nations Environment Programme. Global Environment Outlook 6: Regional Assessments. URL: <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6-regional-assessments>.
167. Variety, Properties and Productive Potential of Soils in Ukraine: an original paper sent from the National Academy of Agrarian Science of Ukraine. 2017. URL: <https://ueaa.info/2017/11/08/variety-properties-and-productive-potential-of-soils-in-ukraine-an-original-paper-sent-from-the-national-academy-of-agrarian-science-of-ukraine/>.

168. Vesterdal L., Schmidt I. K., Callesen I., Nilsson L. O., Gundersen P. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *Forest Ecology and Management*. 2008. Vol. 255, No. 1. P. 35–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.08.015>.
169. Volodymyrenko V. M., Kotlyarevska U. M., Surai V. A., Klochko V. M. Mortmass of forest ecosystems in the modern eco-resource dimension. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2016. Vol. 26, No. 5. P. 188–194. DOI: <https://doi.org/10.15421/40260529>.
170. Wu S., Yu M., Chen L. Nonmonotonic and spatial-temporal dynamic slope effects on soil erosion during rainfall-runoff processes. *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53, No. 2. P. 1369–1389. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016WR019254>.
171. Yan G., Fan C., Zheng J. et al. Forest carbon stocks increase with higher dominance of ectomycorrhizal trees in high latitude forests. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. Art. 5959. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50423-9>.
172. Zachos J. C., Dickens G. R., Zeebe R. E. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*. 2008. Vol. 451, No. 7176. P. 279–283. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature06588>.
173. Zar J. H. *Biostatistical Analysis*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall, 2010. 944 p.
174. Zielonka A., Drewnik M., Musielok Ł., Dyderski M. K., Struzik D., Smulek G., Ostapowicz K. Biotic and abiotic determinants of soil organic matter stock and fine root biomass in mountain area temperate forests—examples from Cambisols under European beech, Norway spruce, and silver fir (Carpathians, Central Europe). *Forests*. 2021. Vol. 12, No. 7. Art. 823. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12070823>.
175. Zuur A. F., Ieno E. N., Elphick C. S. A protocol for data exploration to avoid common statistical problems. *Methods in Ecology and Evolution*. 2010. Vol. 1, No. 1. P. 3–14. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2009.00001.x>.

Статті у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»)

1. Лелека Д. Ю., Шпаківська І. М., Пижик І. С. Запаси органічного карбону в лісових екосистемах Вододільно-Верховинського хребта (Українські Карпати). **Біорізноманіття, екологія та експериментальна біологія**. 2024. Т. 26, № 2. С. 20–28. DOI: <https://doi.org/10.34142/2708-5848.2024.26.2.02>. (*Особистий внесок - збір матеріалів, візуалізація даних, камеральна обробка матеріалів, написання частин тексту*).
2. Леневи́ч О. І., Лелека Д. Ю. Морфологічні особливості лісової підстилки старовікових лісів на природно-заповідних територіях Західних регіонів України. **Науковий вісник НЛТУ України**. 2024. Т. 34, № 8. С. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.36930/40340810>. (*Особистий внесок - збір матеріалів, часткова камеральна обробка, написання частин тексту*).

Статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

3. Novikov A., Rizun V., Susulovsky A., Hushtan H., Hushtan K., Kuzyarin O., Savytska A., Nachychko V., Susulovska S., Leleka D. Data mobilisation at the Fund of Invertebrates of the State Museum of Natural History of the NAS of Ukraine. **Biodiversity Data Journal**. 2024. Vol. 12. e131188. DOI: <https://doi.org/10.3897/BDJ.12.e131188>. (*Особистий внесок - апробація оцифрування колекцій бехребетних*).
4. Novikov A., Savytska A., Kuzyarin O., Nachychko V., Susulovska S., Rizun V., Susulovsky A., Hushtan H., Hushtan K., Leleka D. Data mobilisation in the LWS Herbarium: success and prospects. **Biodiversity Data Journal**. 2024. Vol. 12. e117292. DOI: <https://doi.org/10.3897/BDJ.12.e117292>. (*Особистий внесок - апробація оцифрування колекцій гербарію*).
5. Rizun V., Novikov A., Hushtan K., Hushtan H., Kuzyarin O., Savytska A., Susulovskyi A., Susulovska S., Leleka D., Nachychko V. Rare component of biota in the Data Centre “Biodiversity of Ukraine” and its possible use to identify hotspot

areas and evaluation of biodiversity. **Biosystems Diversity**. 2024. Vol. 32, No. 3. P. 334–344. DOI: <https://doi.org/10.15421/012436>. (Особистий внесок - опрацювання бази даних, редагування тексту).

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Лелека Д. Ю., Гуштан Г. Г. Роль панцирних кліщів (Acari: Oribatida) у колообігу вуглецю природних екосистем. *Актуальні проблеми вивчення ентомофауни західного регіону України : збірник тез науково-практичної конференції* (Броди, 16–18 червня 2023 р.). Львів : Державний природознавчий музей НАН України, 2023. С. 33–34. URL: https://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/29291/1/Holinei_et_al_aktual_prob_lem.pdf. (Особистий внесок 80%: написання тексту, опрацювання літератури).
7. Лелека Д. Ю., Шпаківська І. М., Пижик І. С. Акумуляція органічного Карбону у старовікових лісах Вододільно-Верховинського хребта (Українські Карпати). *Natural Sciences: History, the Present Time, the Future, EU Experience : International Scientific Conference*. Wloclawek, 2023. P. 51–54. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-344-6-12>. (Особистий внесок 60%: написання частин тексту, візуалізація даних, збір матеріалів, камеральна обробка, опрацювання літературних джерел).
8. Шпаківська І. М., Марискевич О. Г., Башта А.-Т. В., Гірна А. Я., Канарський Ю. В., Лелека Д. Ю., Леневи́ч О. І., Пижик І. С., Царик І. Й., Яворницький В. І., Януль В. С., Ященко П. Т. Теоретико-методологічні засади та пілотні дослідження старовікових лісів на території Національного природного парку «Бойківщина». *Роль біосферних заповідників (резерватів) та інших природоохоронних територій для реалізації в Україні стратегії сталого розвитку : матеріали міжнародної науково-практичної конференції* (Рахів, 21 листопада 2023 р.). Рахів, 2023. С. 334–341. (Особистий внесок 7%: написання частин тексту, опрацювання літературних джерел камеральна обробка, частковий збір матеріалів).

9. Лелека Д. Ю. Пілотні дослідження запасів органічного Карбону в екосистемах старовікових лісів Вододільно-Верховинського хребта (Українські Карпати). *Молодь і поступ біології : збірник тез доповідей XX Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів* (Львів, 18–20 квітня 2024 р.). Львів : Сполом, 2024. С. 205–206. URL: https://bioweb.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/04/Zbirnyk-Molod-i-postup-biologhii-2024_.pdf. (Особистий внесок 100%: написання тексту, збір матеріалів, опрацювання літературних джерел, камеральна обробка).
10. Башта А.-Т. В., Гірна А. Я., Канарський Ю. В., Лелека Д. Ю., Леневи́ч О. І., Царик І. Й., Шпаківська І. М., Яворницький В. І., Януль В. С., Ященко П. Т. Дослідження на постійній пробній площі. *Літопис природи Національного природного парку «Бойківщина»*. Т. 3. 2023 р. Бориня, 2024. С. 105–114. (Особистий внесок 10%: написання частин тексту, частковий збір матеріалів, камеральна обробка).
11. Leleka D. Organic Carbon Storage in the Litter of Old-Growth Forests of the Vododilno-Verkhovynskyi Range (Ukrainian Carpathians). *Ecology is a Priority : All-Ukrainian English-Speaking Student Conference* (Kharkiv, March 14, 2025). Kharkiv, 2025. P. 63–64. URI: <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/20978>. (Особистий внесок 100%: написання тексту, збір матеріалів, опрацювання літературних джерел, камеральна обробка).
12. Гамкало З. Г., Лелека Д. Ю., Пижик І. С., Шпаківська І. М., Ященко П. Т. Вдосконалення теоретико-методологічного і методичного підходів до оцінки емісії CO₂ з поверхні ґрунту лісової екосистеми. *Регіональні аспекти флористичних і фауністичних досліджень : матеріали Сьомої міжнародної науково-практичної конференції* (сел. Путила, Чернівецька обл., 4–5 червня 2025 р.). Чернівці : Друк Арт, 2025. С. 99–100. URL: https://cheremoskyi-park.in.ua/wp-content/uploads/2025/12/zbirka-materialiv-7-konf-2025-rik.-Rehionalni-aspekty-2025-r._134-st.pdf. (Особистий внесок 20%: частковий збір матеріалів)

13. Пижик І. С., Лелека Д. Ю., Пука Є. О. Вплив суцільних рубок на запаси органічного карбону в ґрунтах гірських лісових екосистем Львівщини. *Генеза, географія та екологія ґрунтів : збірник наукових праць*. 2025. Вип. 7. С. 192–200. URL: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/11/Povidomlennia-Zbirnyk-do-Pozniaka-2025.pdf>. (Особистий внесок 20%: написання частин тексту, частковий збір матеріалів, часткова камеральна обробка).
14. Leleka D. Yu. Study of Organic Carbon Stocks in the Soil of Old-Growth Forests of the Vododilno-Verkhovynskyi Ridge. *Ecology is a Priority : All-Ukrainian Student English-Speaking Conference with International Participation* (Kharkiv, March 11, 2026). Kharkiv : V. N. Karazin Kharkiv National University, 2026. P. 38–39. URI: <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/25653>. (Особистий внесок 100%: написання тексту, збір матеріалів, опрацювання літературних джерел, камеральна обробка).

Інші публікації здобувача

15. Гуштан Г.Г., Гуштан К.В., Лелека Д.Ю. 2024. Оцифрування колекції мікропрепаратів панцирних кліщів (Acari: Oribatida) з використанням різних типів фотосистем. Актуальні проблеми вивчення ентомофауни західного регіону України: збірник тез науково-практичної конференції (Івано-Франківськ – Стара Гута, 14-16 червня 2024 р.). — Львів: Державний природознавчий музей НАН України. – 17 с. [Електронне видання] <https://synyogora-park.in.ua/wp-content/uploads/2024/04/Zbirnyk-II-chytannia-23042024.pdf> (Особистий внесок 30%: апробація оцифрування мікропрепаратів, написання частин тексту, редагування тексту).
16. Новіков А. та ін. Оцифрування уразливих природничих колекцій. Zenodo. 2023. DOI: 10.5281/zenodo.10251788. (Особистий внесок 7%: апробація оцифрування природничих колекцій).
17. Hushtan H., Hushtan K., Leleka D. Oribatid mites (Sarcoptiformes: Oribatida) of the Lviv region. GBIF occurrence dataset. 2023. DOI: 10.15468/hzpgpm. (Особистий внесок 30%: оцифрування колекцій, підготовка частини датасету).

18. **Rizun V. et al.** SMNH NASU Invertebrates collection. GBIF occurrence dataset. 2024. DOI: 10.15468/ugtaz7. (Особистий внесок 8%: оцифрування колекцій, підготовка частини датасету).