



Дендрокліматичні реконструкції у Карпатах: ретроспектива і потенціал для досліджень змін клімату

Дарія ХОЛЯВЧУК^{1*}  <https://orcid.org/0000-0002-7489-7848>,

УДК 551.58:913(2)

Владислав МАЄВСЬКИЙ¹  <https://orcid.org/0009-0001-8371-8186>,

Дарина ШКАЄВА¹  <https://orcid.org/0009-0001-2113-8602>

ПОШУКОВА СТАТТЯ

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
кафедра фізичної географії, геоморфології та палеогеографії

Листування – *d.kholyavchuk@chnu.edu.ua

Ключові слова: Карпати, дендрокліматичні реконструкції, температура повітря, атмосферні опади, посухи, зміни клімату, природокористування, антропогенний вплив.

Анотація: У дослідженні здійснено синтез та оцінку опублікованих дендрокліматичних досліджень для території Карпат для визначення придатності і потенціалу таких даних у виявленні індикаторів змін клімату.

Здійснено системний бібліографічний аналіз публікацій у науковометричній базі Scopus за пошуковим запитом "(Carpath* AND Climat*)" з подальшим виокремленням кластеру дендрокліматичних досліджень за допомогою побудови мережових концептуальних мап у програмному забезпеченні VOS-viewer. Інтерпретація результатів базується на аналізі радіального річного приросту деревних кілець з використанням параметрів TRW (ширина річних кілець), MXD (максимальна щільність), BI (інтенсивність синього забарвлення) та ізотопного аналізу ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$).

Виявлено нерівномірність просторового охоплення досліджень: найбільше реконструкцій здійснено у Західних Карпатах, найменше – у Південних Карпатах, Південно-Західні Карпати взагалі не охоплені дослідженнями. Найпоширенішим видом у реконструкціях є сосна кедрова. Підтверджено, що клімат Середньовічного теплого періоду є аналогом сучасного потепління, а зниження температури повітря упродовж Малого льодовикового періоду було меншим порівняно з глобальними показниками.

Дендрокліматичні реконструкції Карпат добре узгоджуються з багаторічним ходом літніх температур повітря і ритмікою атмосферних посух. Визначено методологічні обмеження реконструкцій залежно від висотного поясу територій відбору зразків. Застосування новітніх методів (ізотопного аналізу, MXD) вказує на високий потенціал для виявлення кліматичних екстремумів. Зібрані дані придатні для калібрування кліматичних моделей і виявлення як регіональних закономірностей, так і локальних екстремальних подій.



1. ВСТУП

Цілісна інтерпретація різночасових змін у кліматичній системі залежить від розуміння палеоклімату і здатності розрізнити впливи на нього природних і антропогенних чинників. У доповіді Міжурядової групи експертів зі змін клімату (МГЕЗК) зазначено, що застосування палеокліматичних даних суттєво покращує моделювання і прогнозування багатовікових змін клімату (IPCC, 2021). Прогрес у палеогеографічних дослідженнях, зокрема ландшафтів Європи, взаємодоповнюваність накопичених палеокліматичних індикаторів за різними видами природних архівів визначає можливість сучасних регіональних і навіть локальних досліджень змін довкілля у минулому (Холявчук, 2025). Переважна більшість комплексних палеогеографічних реконструкцій містить інформацію про клімат. Такі кліматично чутливі природні архіви можуть містити дані якісного та кількісного характеру. Компліментарно вони забезпечують об'єктивну інтерпретацію палеоклімату і його просторово-часової організації.

Дендрокліматичні реконструкції в гірських регіонах виступають основним джерелом кількісних палеокліматичних даних для тисячолітнього періоду. У цих реконструкціях річні кільця дерев (ширина, щільність) слугують цінними проксі-даними для відтворення минулих кліматичних умов (приземної температури повітря, опадів) протягом століть і навіть тисячоліть. Така інформація виходить за межі інструментальних записів і дає можливість зрозуміти природну мінливість, відкалібрувати сучасні кліматичні моделі та вивчити довгострокові кліматичні тенденції, такі як потепління або збільшення кількості посух. Упродовж останнього десятиліття зафіксовано зростання кількості таких досліджень у Центральній та Східній Європі (Kholiavchuk et al., 2024). Це слугує джерелом для досліджень змін клімату упродовж останнього тисячоліття регіонального масштабу.

Тому дослідження авторів спрямоване на синтез та оцінку опублікованих дендрокліматичних досліджень, що стосуються території Карпат. Такий синтез, окрім формування масиву дендрокліматичних даних, має на меті визначення придатності та потенціалу таких даних для виявлення індикаторів змін клімату.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Основною дослідження послуговував системний бібліографічний аналіз опублікованих досліджень (2561 публікація) у наукометричній базі Scopus за пошуковим запитом "(Carpath* AND Climat*)" за увесь період (до 15 вересня 2025 р.). Детальніше методика відбору публікацій у базі описані у дослідженні автора (Kholiavchuk et al., 2024). На наступному етапі відокремлено кластер дендрокліматичних досліджень (224 публікації). Це здійснено за допомогою побудови мережових концептуальних мап. Їх створено за допомогою програмного забезпечення VOS-viewer на основі ключових слів у виявлених дослідженнях (вимірюється кількістю разів появи ключових слів) і зв'язків (співпоява у публікації) між ними за методикою Van Eck і Waltman (van Eck Nees Janand Waltman, 2014) (рис. 1).

Інтерпретація результатів відібраних досліджень базується на розумінні дендрокліматичних методів. В основі таких методів – аналіз радіального річного приросту кілець дерев. Радіальний річний приріст дерев є комбінацією мінливості клімату, впливу дистурбацій (інвазій шкідників, пожеж, пошкоджень тваринами), віку і розміру, а також інших випадкових факторів (Jiang et al., 2022).

TRW є легко вимірюваним і широко використовуваним параметром у дендрокліматичних дослідженнях. Ширину деревних кілець часто використовують для вивчення біогеографічних зв'язків між рослинами та кліматом. Взаємозв'язок між шириною деревних кілець і кліматичними характеристиками традиційно вважається лінійним, однак сила кліматичного сигналу часто відносно слабка, а сезонне вікно досить вузьке порівняно з іншими параметрами (Jiang et al, 2022).

Ширина кілець сосни звичайної у середньогірних умовах найбільше залежить від температур повітря квітня–серпня, температур осені та зими попереднього року, найбільше – від максимальної температури березня (Nagavciuc, Ionita, et al., 2019). Натомість у передгірних умовах виявлена пряма значуща кореляція із літніми атмосферними опадами, а також обернений зв'язок з літньою температурою повітря (Büntgen et al., 2007; Sochová et al., 2024).

Ріст сосни кедрової (Kern et al., 2016) та модрини (Büntgen et al., 2007) найбільше залежить від температур червня – липня. Приріст кілець ялиці звичайної найбільше пов'язаний з температурами повітря грудня у Східних Карпатах (Bouriaud & Popa, 2009)), листопада – січня у Південних Карпатах ($r=0,69$ (Popa & Cheval, 2007)). Ріст ялини звичайної позитивно корелює: з літніми температурами повітря і весняним зволоженням та вологістю в усьому регіоні; на півночі – найбільше із зимовими опадами та жовтневими температурами року, що передували формуванню кільця; на півдні Карпат – негативно з теплими та сухими умовами осені того року, що передували формуванню кільця.

Інші впливи, такі як збурення (наприклад, збільшення популяції короїдів, буревії, забруднення), можуть видозмінювати взаємозв'язок між ростом дерев і кліматом, ускладнюючи виявлення кліматичних сигналів за деревними кільцями. Хронологічні ряди, які складаються з відносно невеликої кількості зразків, є найбільш чутливими до впливу збурень. Окрім того, існує певне обмеження в хронологіях ширини кільця для фіксації різких кліматичних збурень з підвищеною інерційністю кліматичної системи. Тому в новітніх дендрокліматологічних дослідженнях альтернативними дендрохронологічними та анатомічними параметрами деревини для оцінки частоти та інтенсивності кліматичних екстремумів вважають вміст стабільних ізотопів та максимальної щільності (Büntgen et al., 2015).

Величини MXD найкраще корелюють з максимальною температурою повітря липня – вересня ($r = 0,64$, сосна звичайна у Східних Карпатах; (Nagavciuc et al., 2019), $r=0,69$, ялина звичайна у Західних Карпатах (Büntgen et al., 2007)), опадами листопада – серпня (дуб звичайний у Східних Карпатах (Kern et al., 2013)). Рівень $\delta^{13}\text{C}$ у пізньому прирості дуба є ще більш чутливим до опадів (коефіцієнти кореляції становлять від $-0,68$ до $-0,87$ (Kern et al., 2013)). Найновіші реконструкції у Східних Карпатах свідчать про те, що значення $\delta^{18}\text{O}$ в кільцях дерев забезпечує прямі проксі-дані для виявлених минулих тривалих посух, оскільки відображають процеси транспірації (Nagavciuc et al., 2024).

Основна особливість аналізу деревних кілець для палеокліматичних реконструкцій полягає в тому, що, хоча одне конкретне дерево відображає риси топоклімату, регіональні особливості клімату можна виявити завдяки поєднанню значної кількості зразків та їхньому спряженому аналізу. Дендрокліматичні дані, які реконструйовані на території Карпат, представлені відхиленнями сезонних температур від температур референтного періоду 1960–1990 рр. масиву сіткових даних CRUTEM версії 4.08. Така специфіка враховується авторами при порівнянні з інструментальними даними XX–XXI ст..

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Ретроспектива дендрокліматичних досліджень у Карпатах

У результаті синтезу опублікованих палеогеографічних досліджень за дендрохронологічними даними (рис. 2) виявлено, що найбільше реконструкцій термічного режиму та зволоження для Карпатського регіону здійснено із використанням деревних

Д.Холявчук, В. Маєвський, Д.Шкаєва

Дендрокліматичні реконструкції у Карпатах: ретроспектива і потенціал для досліджень змін клімату

кілець сосни кедрової (*Pinus cembra*), ялини звичайної (*Picea abies*), бука європейського (*Fagus sylvatica*), сосни звичайної (*Pinus silvestris*), ялиці звичайної (*Abies alba*), модрини звичайної (*Larix decidua*), дуба звичайного (*Quercus robur*) із річною роздільною здатністю, і навіть сезонною.

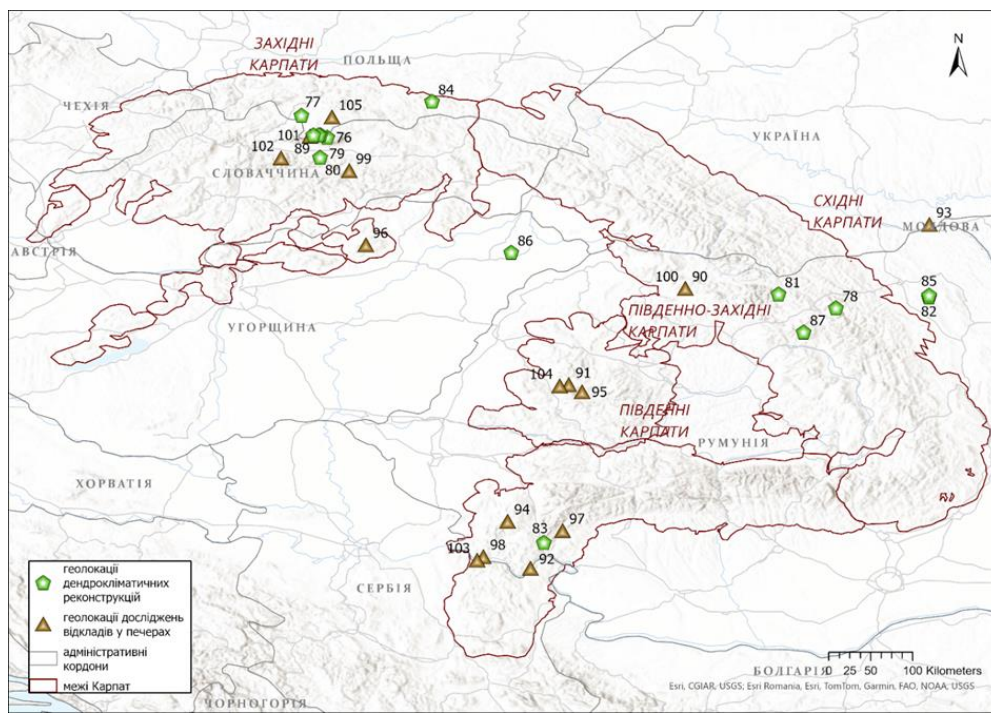


Рис. 2. Геолокації дендрокліматичних досліджень у Карпатах

У ході аналізу опублікованих досліджень нами встановлено, що з-поміж них найбільше дендрокліматичних даних (10 досліджень) отримано із верхньої межі лісу у Західних Карпатах. У Південних Карпатах здійснена лише одна реконструкція. У Південно-Західних Карпатах такі реконструкції взагалі не проводились. У висотному зрізі найкраще представлені Східні Карпати із найдовшою реконструкцією середніх літніх температур повітря (Pora & Kern, 2009). Ці дослідження не повною мірою охоплюють час Середньовічного кліматичного періоду. Тому можливість виявлення регіональних просторових закономірностей кліматичної мінливості на початку минулого тисячоліття у Карпатах обмежена.

Найчастіше використовуваним видом у дендрокліматичних реконструкціях регіону є сосна кедрова. Причинами цього є значне довголіття виду, обмежена еконіша (поблизу верхньої межі лісу), виражений температурно-регульований ріст, велика кількість добре збережених пнів і реліктового матеріалу (Kern et al., 2023). Зразки сосни кедрової краще зберігають кліматичний сигнал у низькочастотному діапазоні (3–10 років) (Kern et al., 2016).

У відібраних статтях за дендрокліматичною тематикою виявлено п'ять досліджень у Карпатах, у яких застосовано ізотопний аналіз. Наприклад, встановлено, що вміст ізотопу $\delta^{13}\text{C}$ у пізньому прирості дуба є дуже чутливим до кількості атмосферних опадів у вегетаційний період (коефіцієнти кореляції становлять від -0,68 до -0,87 (Kern et al., 2013)). Найновіші реконструкції у Східних Карпатах свідчать про те, що значення $\delta^{18}\text{O}$ в кільцях дерев забезпечує прямі дендрокліматичні дані для виявлених минулих тривалих посух, оскільки відображає процеси транспірації (Nagavciuc et al., 2024).

3.2. Застосування результатів дендрокліматичних реконструкцій в інтерпретації регіональних змін клімату і довкілля із застосуванням дендрохронології

Проаналізовані реконструкції дають змогу зробити цінні висновки про зміни клімату і довкілля у різних регіонах Карпат упродовж останнього тисячоліття. При порівнянні інструментальних і дендрокліматичних даних, які охоплюють кінець XIX і XX ст., підтверджено придатність їх застосування і для виявлення короткоперіодичних змін клімату.

На основі дендрокліматичних реконструкцій у Західних і Східних Карпатах [Büntgen et al., \(2011, 2013\)](#) виявлено, що клімат Середньовічного теплого періоду є кліматичним аналогом сучасного потепління (*рис. 3*). Однак у середньогір'ї Східних Карпат, згідно з дендрокліматичною реконструкцією липневих температур повітря, не виявлено статистично значимого потепління (*рис. 3*). На нашу думку, на це могли вплинути умови зростання сосни кедрової, зразки якої відбирались, у поясі активного опадоутворення внутрімасового та адвективного походження.

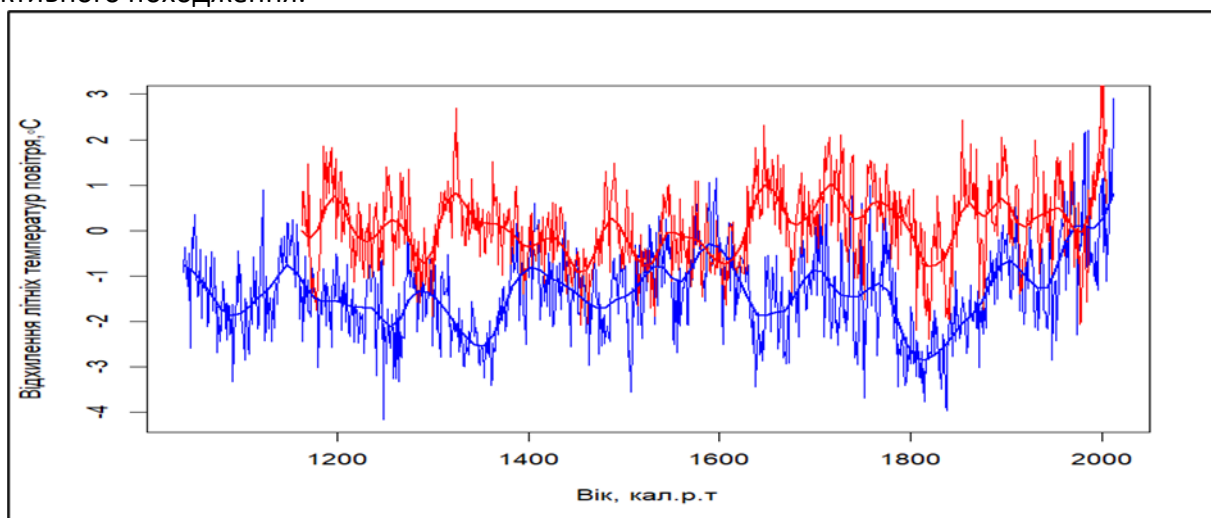


Рис. 3. Відхилення літніх температур повітря (від кліматичної норми 1961-1990 рр.) у різних регіонах Карпат упродовж останнього тисячоліття: червоним зображено температури у горах Калімані, Східні Карпати ([Popa & Kern, 2009](#)); синім – у горах Татрах, Західних Карпат ([Büntgen et al., 2013](#)). Потовщені лінії вказують на значення згладжених середніх температур

За дендрокліматичними реконструкціями підтверджено, що загалом вологі фази у межах Середньовічного теплого періоду у Карпатах охоплюють час сонячних мінімумів Оорта (1010–1040 і 1050–1080 рр.) і пов'язані зі значною мінливістю фаз Північноатлантичного колювання. Ці радіаційно спричинені відносно холодніші періоди, які відображені у нижчих літніх температурах повітря, найбільше співпадають при порівнянні палеокліматичних реконструкцій за різними палеокліматичними індикаторами у Карпатах ([Büntgen et al., 2013](#); [Longman et al., 2019](#); [Onac et al., 2014](#)). На основі опублікованих дендрокліматичних реконструкцій, які виконано у різних лісових біокліматичних поясах Карпат, виявлено, що зниження температури повітря упродовж Малого льодовикового періоду у Карпатах було меншим, ніж у середньому глобально і у масштабі території Європи.

Дендрокліматичні реконструкції є цінними для встановлення початку та завершення кліматичних періодів різної тривалості. Так, у часовому ряді реконструйованих температур літа упродовж 1040–2011 рр. (за дендрокліматичними індикаторами, отриманими ([Büntgen et al., 2013](#))), у 1350 р. виявлено зсув у бік переважання циклів в діапазоні 16–32 років. Це може свідчити про пізній перехід до Малого льодовикового періоду у середньогір'ї Західних

Карпат. Ранні ознаки закінчення Малого льодовикового періоду до кінця XVIII століття та окремі холодні роки (1818, 1820-ті, 1840-ті) зафіксовано у кільцях дерев у Східних Карпатах (Popa & Bouriaud, 2014; Popa & Kern, 2009). Згідно з вейвлетним аналізом рядів дендрокліматичних даних у Західних Карпатах (Büntgen et al., 2013) 1850 р. – рік переходу до іншої ритміки, коли міжрічних 2–4-річних коливань температур повітря літа стає менше і домінуючими стають триваліші періоди (64–128 років).

Дендрокліматичні ряди даних придатні для виявлення екстремальних кліматичних подій регіонального і локального характеру. До прикладу, дощове і вологе літо 1662, 1663 і 1675 рр. виявлене у реконструкції клімату Татр (Niedźwiedź, 2010) співпадає з такими ж подіями, які реконструйовано для всієї території Центральної Європи. Проте у 1600–1720 рр. (час сонячного мінімуму Маундера) у Східних Карпатах виявлено тепліші епізоди, порівняно із кліматом Західних Карпат. Ймовірно, це пов'язано із адвекцією середземноморських циклонів. У більшості регіонів Карпат, окрім Південних, найнижчі температури повітря реконструйовано на початку XIX століття, резонуючи з часом виверження Тамбори у 1815 р. Однак такий вплив виражений менше, ніж на теренах Західної Європи (Büntgen et al., 2015; Popa & Kern, 2009).

Висока частота посух – ще одна особливість Малого льодовикового періоду на прикінцевій фазі, що підтверджено у дендрокліматичних реконструкціях. У Східних Карпатах найбільшу кількість та інтенсивність посушливих років зафіксовано в XIX столітті (Roibu et al., 2022). Трьохрічна посуха протягом 1805–1807 рр. і посушливий період 1860-х рр. реконструйовано за кільцями дуба у передгір'ї Північноугорських Карпат (Kern et al., 2013). Їх вважають найекстремальнішими періодами посух Малого льодовикового періоду.

На основі зразків з високогір'їв і висотного лісового геокотону точніше можна реконструювати літні температури повітря під час холодних фаз. Літні температури повітря під час теплих періодів на основі деревних кілець з цих регіонів будуть завищеними. У випадку реконструкції зволоження, дані будуть менш точними у холодні і вологі періоди, зважаючи на меншу чутливість. Після виверження вулканів, значення TRW можуть бути також заниженими через посилення фотосинтезу розсіяною радіацією, зменшення тривалості вегетаційного періоду.

Виявлення антропогенного впливу на зміни довкілля можливе через оцінку збурень, відображених у ширині річних кілець і дендрохронологічних досліджень деревини, що використовувалась для будівництва у різних регіонах Карпат. Такі дослідження упродовж останнього десятиліття почали з'являтися і на теренах Карпат (Sochová et al., 2025). На основі таких реконструкцій також підтверджено, що антропогенно спричинене скорочення лісового покриву у Карпатах досягло максимуму у кінці XIX ст.

4. ВИСНОВКИ

Систематичний бібліографічний аналіз дендрокліматичних публікацій у наукометричній базі Scopus виявив нерівномірність просторового охоплення дендрокліматичних досліджень у Карпатах. Найбільша кількість реконструкцій (10 досліджень) здійснено у Західних Карпатах на верхній межі лісу, тоді як Південні Карпати представлені лише однією реконструкцією, а Південно-Західні Карпати взагалі не охоплені такими дослідженнями.

Встановлено, що найпоширенішим видом у дендрокліматичних реконструкціях регіону є сосна кедрова (*Pinus cembra*), що зумовлено значним довголіттям виду, обмеженою еконишею поблизу верхньої межі лісу, вираженим температурно-регульованим ростом та великою кількістю добре збереженого реліктового матеріалу. Зразки цього виду краще зберігають кліматичний сигнал у низькочастотному діапазоні (3–10 років).

Дендрокліматичні реконструкції підтвердили, що клімат Середньовічного теплого періоду є кліматичним аналогом сучасного потепління у Західних і Східних Карпатах.

Д.Холявчук, В. Маєвський, Д.Шкаєва

Дендрокліматичні реконструкції у Карпатах: ретроспектива і потенціал для досліджень змін клімату

Водночас у середньогір'ї Східних Карпат не виявлено статистично значимого потепління цього періоду, що може бути пов'язано з особливостями умов зростання сосни кедрової у поясі активного опадоутворення. На основі синтезу дендрокліматичних даних встановлено, що зниження температури повітря упродовж Малого льодовикового періоду у Карпатах було меншим порівняно із середніми глобальними показниками і показниками для території Європи загалом.

Підтверджено, що за допомогою дендрокліматичних реконструкцій можна виявляти: 1) кліматичні періоди різної тривалості; 2) повторюваність екстремальних кліматичних подій, посух зокрема; 3) сигнали великих вулканічних вивержень; 3) антропогенні сліди впливу на зміни довкілля. Дендрокліматичні дані для території Карпат придатні для виявлення як регіональних просторових закономірностей кліматичної мінливості, так і локальних екстремальних кліматичних подій. Підтверджено їх узгодженість із багаторічним ходом літніх температур повітря і ритмікою атмосферних посух, що визначає потенціал використання для калібрування сучасних кліматичних моделей.

Встановлено потенціал застосування новітніх методів дендрокліматології для Карпатського регіону. Ізотопний аналіз ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) забезпечує високу чутливість до атмосферних опадів (коефіцієнти кореляції від -0,68 до -0,87) і дає змогу виявляти тривалі посухи. Максимальна щільність деревини (MXD) є альтернативним параметром для оцінки кліматичних екстремумів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Холявчук, Д. І. (2025). *Зміни клімату та їхнє відображення у ландшафтних регіонах Карпат впродовж останнього тисячоліття*. (Дис. доктора. геогр. наук) Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Київ. [Kholiavchuk, D. I. (2025). *Zminy klimatu ta yikhnie vidobrazhennia u landshaftnykh rehionakh Karpat vprodovzh ostannoho tysiacholittia*. (Dys. doktora. heohr. nauk) Kyivskyi natsionalnyi universytet imeni Tarasa Shevchenka. Kyiv.]
2. Büntgen, U., & Tegel, W. (2011). European tree-ring data and the Medieval Climate Anomaly. *PAGES News*, 19(1). <https://doi.org/10.22498/pages.19.1.14>.
3. Büntgen, U., Frank, D. C., Kaczka, R. J., Verstege, A., Zwijacz-Kozica, T., & Esper, J. (2007). Growth responses to climate in a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Tree Physiology*, 27(5), 689–702. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.5.689>.
4. Büntgen, U., Franke, J., Frank, D., Wilson, R., González-Rouco, F., & Esper, J. (2010). Assessing the spatial signature of European climate reconstructions. *Climate Research*, 41(2). <https://doi.org/10.3354/cr00848>.
5. Büntgen, U., Kyncl, T., Ginzler, C., Jacks, D. S., Esper, J., Tegel, W., Heussner, K. U., & Kyncl, J. (2013). Filling the Eastern European gap in millennium-long temperature reconstructions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(5). <https://doi.org/10.1073/pnas.1211485110>.
6. Büntgen, U., Trnka, M., Krusic, P. J., Kyncl, T., Kyncl, J., Luterbacher, J., Zorita, E., Ljungqvist, F. C., Auer, I., Konter, O., Schneider, L., Tegel, W., Štěpánek, P., Brönnimann, S., Hellmann, L., Nievergelt, D., & Esper, J. (2015). Tree-ring amplification of the early nineteenth-century summer cooling in central Europe. *Journal of Climate*, 28(13), 5272–5288. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00673.1>.
- IPCC (2021). IPCC AR6 WG1 The Physical Science Basis. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
7. Jiang, Y., Begović, K., Nogueira, J., Schurman, J. S., Svoboda, M., & Rydval, M. (2022). Impact of disturbance signatures on tree-ring width and blue intensity chronology structure and climatic signals in Carpathian Norway spruce. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109236>.
8. Kern, Z., Nagavciuc, V., Hatvani, I. G., Hegyi, I. N., Loader, N. J., & Popa, I. (2023). Evaluation of the non-climatic (age-related) trends of stable oxygen and carbon isotopes in Swiss stone pine (*Pinus cembra* L.) tree rings from the Eastern Carpathians, Romania. *Dendrochronologia*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126061>.
9. Kern, Z., Németh, A., Horoszné Gulyás, M., Popa, I., Levanič, T., & Hatvani, I. G. (2016). Natural proxy records of temperature- and hydroclimate variability with annual resolution from the Northern Balkan–Carpathian region for the past millennium – Review & recalibration. *Quaternary International*, 415, 109–125. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.01.012>.
10. Kern, Z., Patkó, M., Kázmér, M., Fekete, J., Kele, S., & Pályi, Z. (2013). Multiple tree-ring proxies (earlywood width, latewood width and $\delta^{13}\text{C}$) from pedunculate oak (*Quercus robur* L.), Hungary. *Quaternary International*, 293, 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.05.037>.

Д.Холявчук, В. Маєвський, Д.Шкаєва

Дендрокліматичні реконструкції у Карпатах: ретроспектива і потенціал для досліджень змін клімату

11. Kholiavchuk, D., Gurgiser, W., & Mayr, S. (2024). Carpathian Forests: Past and Recent Developments. *Forests*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/f15010065>.
12. Levanič, T., Popa, I., Poljanšek, S., & Nechita, C. (2013). A 323-year long reconstruction of drought for SW Romania based on black pine (*Pinus Nigra*) tree-ring widths. *International Journal of Biometeorology*, 57(5). <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0596-9>
13. Longman, J., Veres, D., Ersek, V., Haliuc, A., & Wennrich, V. (2019). Runoff events and related rainfall variability in the Southern Carpathians during the last 2000 years. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41855-1>.
15. Nagavciuc, V., Helle, G., Rădoane, M., Roibu, C.-C., Cotos, M.-G., & Ionita, M. (2024). A long-term drought reconstruction based on oxygen isotope tree ring data. *EGUsphere*, 2024, 1–22. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2144>.
16. Nagavciuc, V., Ionita, M., Perşoiu, A., Popa, I., Loader, N. J., & McCarroll, D. (2019). Stable oxygen isotopes in Romanian oak tree rings record summer droughts and associated large-scale circulation patterns over Europe. *Climate Dynamics*, 52(11), 6557–6568. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4530-7>
17. Nagavciuc, V., Kern, Z., Ionita, M., Hartl, C., Konter, O., Esper, J., & Popa, I. (2020). Climate signals in carbon and oxygen isotope ratios of *Pinus cembra* tree-ring cellulose from the Călimani Mountains, Romania. *International Journal of Climatology*, 40(5), 2539–2556. <https://doi.org/10.1002/joc.6349>
18. Nagavciuc, V., Mursa, A., Ionita, M., Sfeclă, V., Popa, I., & Roibu, C.-C. (2023). An Overview of Extreme Years in *Quercus* sp. Tree Ring Records from the Northern Moldavian Plateau. *Forests*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/f14050894>.
19. Nagavciuc, V., Mursa, A., Ionita, M., Sfeclă, V., Popa, I., & Roibu, C.-C. (2023). An Overview of Extreme Years in *Quercus* sp. Tree Ring Records from the Northern Moldavian Plateau. *Forests*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/f14050894>
20. Nechita, C., Popa, I., & Eggertsson, Ó. (2017). Climate response of oak (*Quercus* spp.), an evidence of a bioclimatic boundary induced by the Carpathians. *Science of the Total Environment*, 599–600, 1598–1607. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.118>
21. Niedźwiedź, T. (2010). Summer temperatures in the Tatra Mountains during the Maunder Minimum (1645–1715). In *The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview*. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3167-9_19
22. Onac, B. P., Forray, F. L., Wynn, J. G., & Giurgiu, A. M. (2014). Guano-derived $\delta^{13}\text{C}$ -based paleo-hydroclimate record from Gaura cu Musca Cave, SW Romania. *Environmental Earth Sciences*, 71(9). <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2789-x>
23. Popa, I., & Bouriaud, O. (2014). Reconstruction of summer temperatures in Eastern Carpathian Mountains (Rodna Mts, Romania) back to AD 1460 from tree-rings. *International Journal of Climatology*, 34(3), 871–880. <https://doi.org/10.1002/joc.3730>
24. Popa, I., & Cheval, S. (2007). Early Winter Temperature Reconstruction of Sinaia Area (Romania) Derived From Tree-Rings of Silver Fir (*Abies Alba* Mill.). *Romanian Journal of Meteorology*, 9(1).
25. Popa, I., & Kern, Z. (2009). Long-term summer temperature reconstruction inferred from tree-ring records from the Eastern Carpathians. *Climate Dynamics*, 32(7–8), 1107–1117. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0439-x>
26. Roibu, C. C., Nagavciuc, V., Ionita, M., Popa, I., Horodnic, S. A., Mursa, A., & Büntgen, U. (2022). A tree ring-based hydroclimate reconstruction for Eastern Europe reveals large-scale teleconnection patterns. *Climate Dynamics*, 59(9–10). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06255-8>
27. Sochová, I., Kolář, T., Árvai, M., Bošela, M., Čufar, K., Kern, Z., Kyncl, J., Marčíš, P., Mészáros, I., Morgós, A., Mursa, A., Popa, A., Roibu, C.-C., Sopushynskyy, I., & Rybníček, M. (2024). The palaeoclimatic potential of recent oak tree-ring width chronologies from Southwest Ukraine. *Dendrochronologia*, 84, 126168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126168>
28. Sochová, I., Kolář, T., Brázdil, R., Kyncl, T., Kyncl, J., Melo, M., Trnka, M., Bilanych, M., & Rybníček, M. (2025). A new 621-year Transcarpathian oak tree-ring chronology (Eastern Europe). *Dendrochronologia*, 89, 126284. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126284>

Dariia Kholiavchuk, Vladyslav Maievskiy, Daryna Shkaieva

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Department of Physical Geography,
Geomorphology and Palaeogeography

Dendroclimatic reconstructions in the Carpathians: retrospective and potential for environmental change studies

Keywords: Carpathians, dendroclimatic reconstructions, air temperature, atmospheric precipitation, droughts, climate change, nature use, anthropogenic influence.

Д.Холявчук, В. Маєвський, Д.Шкаєва

Дендрокліматичні реконструкції у Карпатах: ретроспектива і потенціал для досліджень змін клімату

Abstract: The study synthesises and evaluates published dendroclimatic studies of the Carpathian region to determine the suitability and potential of such data for identifying climate change indicators.

A systematic bibliographic analysis of 2,561 publications in the Scopus database was conducted using the search query "(Carpath* AND Climat*)", followed by the identification of a cluster of dendroclimatic studies (224 publications) through the construction of network conceptual maps. The interpretation of results is based on the analysis of radial annual tree ring growth using TRW (tree ring width), MXD (maximum density), BI (blue intensity), and isotopic analysis ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$) parameters.

Uneven spatial coverage of studies was revealed in the Carpathians. The largest number of reconstructions was conducted in the Western Carpathians (10 studies), the smallest in the Southern Carpathians (1 study), while the South-Western Carpathians are not covered at all. The most common species in reconstructions is Swiss stone pine (*Pinus cembra*).

Dendroclimatic studies confirm that the Medieval Warm Period climate is analogous to modern warming, while the temperature decline during the Little Ice Age was smaller compared to global indicators. Wavelet analysis revealed changes in rhythmicity: from 1350 CE to 16–32-year cycles, and from 1850 CE to 64–128-year cycles. High drought frequency was established during the final phase of the Little Ice Age, especially in the 19th century.

Based on the synthesis of dendroclimatic data, it was established that the decline in air temperature during the Little Ice Age in the Carpathians was lower compared to average global indicators and those for the European territory as a whole. High drought frequency was detected in the final phase of this period, particularly in the 19th century in the Eastern Carpathians.

Dendroclimatic reconstructions of the Carpathians demonstrate good agreement with long-term summer air temperature patterns and the rhythmicity of atmospheric droughts. Methodological limitations of reconstructions depending on the elevation zone of sample collection were determined. Novel methods (isotopic analysis, MXD) demonstrate high potential for detecting climatic extremes.

Dendroclimatic data from the Carpathians are suitable for identifying both regional spatial patterns of climate variability and local extreme climatic events. Their consistency with long-term patterns of summer air temperatures and atmospheric drought rhythmicity has been confirmed, which determines the potential for use in calibrating modern climate models.

Tree-ring data are found to be a potential source for distinguishing the anthropogenic signal in environmental changes.