

СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ ДОСЛІДЖЕННЯ

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-10>

УДК(UDC): 630*561.24

І. М. КОВАЛЬ, д-р. с.-г. наук, ст. наук. співроб.

Провідний науковий співробітник сектору екології лісу відділу лісівництва
та економіки лісового господарства¹

Професорка кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи²

e-mail: Koval_Iryna@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>

¹Український науково-дослідний інститут лісового господарства та
агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького

вул. Григорія Сковороди, 86, м. Харків, 61024, Україна

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Майдан Свободи, 6, м. Харків, 61022, Україна

A. BRÄUNING, д-р географ. наук, проф.

Професор кафедри географії та природничих наук

e-mail: achim.braeuning@fau.de ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3106-4229>

Інститут географії при Університеті ім. Фрідріха-Олександра міст Ерлангена та Нюрнберга
Веттеркреуз 15, 91058, Ерланген, Німеччина

ВПЛИВ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА РАДІАЛЬНИЙ ПРИРІСТ *PINUS SYLVESTRIS* L. ТА *QUERCUS ROBUR* L. В НАСАДЖЕННЯХ ЗЕЛЕНОЇ ЗОНИ М. ХАРКІВ¹

Мета. Виявлення особливостей реакції радіального приросту сосни звичайної (*Pinus Sylvestris* L.) та дуба звичайного (*Quercus robur* L.) на зміну клімату в лісостеповій зоні України.

Методи. Застосовано дендрохронологічні, дендрокліматологічні, статистичні методи. Використано програми COFESHA та ARSTAN.

Результати. Дослідження проведено в 100-річних насадженнях дуба звичайного та сосни звичайної в Південному лісництві (Лівобережний Лісостеп). Порівняно реакцію радіального приросту дерев на зміну клімату для 1960-1987 та 1988-2016 рр. Для дендрокліматичного аналізу використано гідротермічні показники де Мартонне, гідротермічний коефіцієнт Селянинова, індекс аридності лісів та гідротермічний коефіцієнт O_1 . Також використано показники відносної вологості, які є похідними від температури та опадів. Виявлено, що у другому періоді підвищилася чутливість реакції радіального приросту дерев до варіацій клімату, що свідчить про деяке ослаблення насаджень у зв'язку з підвищенням температур. Дендрокліматичний аналіз *Pinus sylvestris* L. та *Quercus robur* L. показав, що при порівнянні відгуку радіального приросту дерев до варіацій клімату у 1960-1987 рр. та 1988-2016 рр., стан як сосни так і дуба послабився, про що свідчить збільшення значущих коефіцієнтів кореляції між індексами приросту і кліматичними чинниками.

Висновки. Сосна виявилася більш чутливою до зміни клімату порівняно з дубом. Водночас ці породи дерев на даному етапі змогли адаптуватися до зміни клімату, про що свідчать деревно-кільцеві хронології, які показують стабільний приріст упродовж 2010-2016 рр.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дуб звичайний, сосна звичайна, зміна клімату, гідротермічні коефіцієнти, відносна вологість

Як цитувати: Коваль І. М., Bräuning A. Вплив зміни клімату на радіальний приріст *Pinus Sylvestris* L. та *Quercus Robur* L. в насадженнях зеленої зони м. Харків. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2024. Вип. 41. С. 130-142. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-10>

In cites: Koval I. M., & Bräuning A. (2024). The effect of climate change on the radial growth of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus robur* L. in the stands of Kharkiv green zone. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (41), 130-142. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-10> (in Ukrainian)

© Коваль І. М., Bräuning A., 2024



[This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

¹ Дослідження виконане за проектом «Radial growth of Scots pine and Scots oak in the Forest Steppe of Ukraine» із грантовою підтримкою Університету ім. Фрідріха-Олександра міст Ерлангена та Нюрнберга

Вступ

Клімат Землі швидко змінюється, тому важливо оцінити ймовірний вплив зміни клімату на вразливі екосистеми по всьому світу. Ліси містять найбільший у світі наземний басейн вуглецю і є основним поглиначем, який зменшує накопичення вуглекислого газу в атмосфері. Зміна клімату, ймовірно, призведе до суттєвих змін у структурі та функціях лісів [1].

Вплив мінливості клімату на ліси можна якнайкраще оцінити за кільцями дерев, які дуже чутливі до змін умов навколишнього середовища. Проте існують суперечливі дані щодо реакції лісів на зміну клімату. Кліматичні зміни в останні десятиліття та в найближчі роки можуть стати серйозною загрозою для лісів світу та їх ролі як потенційних поглиначів вуглецю, тому в майбутньому необхідні узгоджені дослідження, щоб підтвердити динаміку росту лісів у зв'язку зі зміною клімату та їх адаптацію до цієї зміни [2].

В 2023 році опубліковано новий кліматичний звіт [3], у якому говориться, що з усіх континентів Землі, саме Європа нагрівається вдвічі швидше за інші частини світу. Дані дослідження свідчать про те, що починаючи з 1980-х років, температура тут підвищилася на 1,2°C. Однією з найбільш важливих функцій лісів є кліматорегулювальна. Найбільш відчутними є впливи на температуру повітря, ґрунту, вологість, швидкість вітру, рухомість повітряних мас, зниження шуму, очищення повітря від пилегазових викидів та ін., а також як головний наземний поглинач парникових газів [4]. Зміна клімату характеризується як підвищенням температури так і зміною режиму опадів. Відповідно, екстремальні кліматичні явища, такі як сильні посухи, зросли за частотою та інтенсивністю, і ця тенденція, за прогнозами, збережеться в майбутньому [5].

Об'єкти та методи дослідження

Керни сосни відібрано в Південному лісництві (квартал 159, вид. 2) в чистому основному насадженні (широта 50°03'27"N 36°21'08"E (50,0575690; довгота 36,3524113). Для насадження характерні такі показники: $H_{\text{сер.}}=24$ м, $D_{\text{сер.}}=42$ см, клас бонітету II, тип лісу В₂-дС (свіжа соснова-дубова субір), повнота 0,6, запас деревини на 1 га 310 м³.

Дендрохронологія (вивчення кілець дерев) надає важливу інформацію для реконструкції клімату в минулому та оцінки впливу кліматичних змін і антропогенних порушень на ріст дерев. Кільця дерев, якщо розглядати їх як часові ряди річних приростів, представляють цінний довгостроковий запис росту дерев у багатьох лісових середовищах. Види дерев унікальні у своїй реакції на умови довкілля і можуть бути використані як відбиток недавніх кліматичних змін і природний архів минулого клімату. Вплив зміни клімату на ліси світу є дискусійним питанням. Існує невизначеність щодо того, чи можуть підвищення температури та зміна схеми опадів посилити чи зменшити ріст та продуктивність лісів. Зміна температури та опадів і швидкість цих змін є одними з найважливіших факторів зміни клімату. Є сенс аналізувати температуру й опади одночасно. Параметри, в яких є математичний коефіцієнт/співвідношення опадів (або значень вологості повітря) і температури, відомі як індекси посушливості та використовуються як міра посушливості. Таким чином, індекси посушливості є важливими не тільки як індикатори росту рослин, але також можуть розглядатися як важливі індикатори змін клімату [2, 6, 7].

Дослідженням впливу варіацій клімату на радіальний приріст дуба звичайного та сосни звичайної в Україні присвячена низка досліджень [8, 9].

Дослідження є продовженням досліджень реакції радіального приросту сосни звичайної та дуба звичайного на варіації клімату [10, 11].

Мета – виявлення особливостей реакції радіального приросту сосни звичайної (*Pinus Sylvestris* L.) та дуба звичайного (*Quercus robur* L.) на зміну клімату в лісостеповій зоні України.

Керни дубу відібрано в 100-річних чистих дубових насадженнях вегетативного походження Південного лісництва (кв. 116, вид. 9) (50°05'31"N 36°17'40"E., або 50,0920616, 36,2944293). $H_{\text{сер.}}$ становить 25 м, $D_{\text{сер.}}$ – 40 см. Бонітет II. Тип лісу (ТЛУ) Д₂-кл.Д (Свіжа кленово-липова діброва). Повнота – 0,60, запас – на 1 га 270 м³.

Використано дані Харківської метеостанції, розташованої в аеропорту (49°55'N 36°17'E, висота на рівнем моря 152 м). Клімат помірно-континентальний із середньорічною температурою повітря 8,1 °C і середньорічною кількістю опадів 558 мм.

Застосовано стандартні дендрохронологічні методики [7, 12, 13]. Керни було відібрано буровом Преслера на висоті 1,3 м від кореневої шийки. З кожної біогрупи в сосновому та дубовому насадженні було відібрано по 20 зразків. Шари річної, ранньої та пізньої деревини виміряно за допомогою стереомікроскопу та цифрового приладу для вимірювання деревних кілець LINTAB з використанням програми TSAP з точністю 0,01 мм в дендрохронологічній лабораторії Інституту географії при Університеті ім. Фрідріха-Александра міст Ерлангена та Нюрнберга в Німеччині. Методом скелетних графіків проведено перехресне датування за допомогою якого встановлено календарну дату формування для кожного деревного кільця. Якість датування перевірено за допомогою програми COFESHA. На базі індивідуальних деревно-кільцевих хронологій створені локальні хронології шляхом осереднення індивідуальних хронологій сосни та дубу. Біологічна (вікова) складова, тобто некліматичний тренд було видалено з деревно-кільцевих хронологій за допомогою програми ARSTAN, тобто було проведено стандартизацію деревно-кільцевих хронологій. Отримано три індексних деревно-кільцевих хронологій: STANDART, RESIDUAL, ARSTAN.

Під час обчислення STANDART хронології використано негативну експоненту. Ця версія обчислюється за формулою:

$$\text{Index}(t) = R(t) / Y(t), \quad (1)$$

де $Y(t)$ – очікуваний річний приріст, визначений із апроксимованої кривої; $R(t)$ – величина кільця поточного року.

Без авторегресійного аналізу створюється тільки ця версія хронології. Версія хронології RESIDUAL обчислюється таким самим способом, що і стандартна, але використовується однімірне авторегресійне моделювання. Хронологію ARSTAN обчислено на основі коефіцієнтів авторегресії, отриманих під час багатомірного авторегресійного моделювання. Ми використали хронологію RESIDUAL, яка показала найкращі результати при дендрокліматичному аналізі.

Для виявлення зв'язків між радіальним приростом дерев та кліматичними чинниками використано кореляційний аналіз. Для дендрокліматичного аналізу застосовано гідротермічні коефіцієнти [6]. Найбільш відомим параметром посушливості є індекс посушливості Де Мартонне (DM). Цей індекс можна розрахувати для різних часових масштабів, таких як місяці, сезони та роки. Індекс DM використовується в усьому світі для визначення умов сухого/вологого клімату будь-якого даного регіону або регіонів. Річні та місячні значення індексу посушливості DM , Ia_{DM} та Im_{DM} , можуть бути представлені рівняннями 2 та 3 відповідно:

$$Ia_{DM} = \frac{Pa}{Ta + C'} \quad (2)$$

$$Im_{DM} = \frac{Pm}{Tm + C'} \quad (3)$$

де Pa та Pm – річна та місячна кількість опадів, Ta та Tm – середні річні та місячні температури повітря та $C' = 10$ °C – константа Де Мартонне.

Гідротермічний коефіцієнт зволоження Г.Т. Селянінова (ГТК) – це сума опадів за період, коли середньодобова температура повітря вище +10° C поділена на суму активних температур за той же період, коли температури перевищували +10° C, зменшена в 10 разів.

Розраховується за формулою:

$$\text{ГТК} = R / 0,1 \sum T \quad (4)$$

де R – кількість опадів за період з температурою вище 10;

$\sum T > 10^\circ$ – сума активних температур вище 10°C.

Цей показник має перевагу над іншими і характеризує не тільки прибуткову частину водного балансу (опадів), а й непродуктивну витрату вологи (випаровуваність з поверхні ґрунту, рослинності). ГТК є достовірним показником зволоження в тих районах, для яких характерний однорідний тип річного ходу опадів. Окрім того, він об'єктивний і працює в достатньо широкому діапазоні сполучень температури та опадів.

Індекс аридності лісів (Forestry Aridity Index, FAI) визначається як

$$FAI = Cg \cdot T_{VII-VIII} / (P_{V-VII} + P_{VII-VIII}) \quad (5)$$

Де $T_{VII-VIII}$ – середня температура в липні та серпні в °C, P_{V-VII} – сума опадів з травня по липень та $P_{VII-VIII}$ – сума опадів для

липня-серпня, в мм та $Cg - 100 \text{ мм}/^{\circ}\text{C}$ є константою. Вводячи константу Cg з розмірністю, FAI втратив свою розмірність і став «істинним» індексом, тобто безрозмірним числом. FAI може бути дуже хорошим інструментом для представлення кліматичних умов під час щорічного росту лісу, що особливо важливо для тих, хто займається лісовим і сільським господарством [6].

Для характеристики умов довкілля можна також використовувати комплексні кліматичні показники – співвідношення температури повітря і кількості опадів за гідрологічний рік, який починається з жовтня попереднього року і закінчується у вересні поточного року:

Результати дослідження

При порівнянні середньорічних температур за 1960-1987 та 1988-2016 рр. виявлено збільшення температур у другому періоді на 14°C (14%) та відповідно збільшення кількості опадів на 42 мм (7%) (рис. 1). Тобто у першому періоді середньорічна температура становила $7,47 \pm 0,18$, а у другому періоді – $8,68 \pm 0,16$. Кількість опадів збільшилася у другому періоді на 42 мм (7%). Отже, у

$$O_I = t_o \cdot 100 / V_o \quad (6)$$

де O_I – гідротермічний коефіцієнт; t_o – температура за гідрологічний рік ($^{\circ}\text{C}$), V_o – сума опадів (мм) за той же період.

Відносну вологість, що є інтегральним показником, який відображає співвідношення тепла та вологи, також використано для дендрокліматичного аналізу.

Температури та опади обчислено за гідрологічний рік, тобто з жовтня попереднього року по вересень поточного. Норму опадів та температур за різні періоди гідрологічного року обчислювали як середнє за 1960-2016 рр.

першому періоді випало $536,74 \pm 20,02$, а у другому – $578,69 \pm 18,30$ (рис. 1). Збільшення опадів відбувалося нерівномірно по сезонам року. Так в теплий період (упродовж квітня-серпня) кількість опадів збільшилася на 18 мм (7%) у другому періоді порівняно з першим, а упродовж холодного періоду, коли відбувається вологонакопичення в ґрунті навпаки зменшилася на 21 мм (11%).

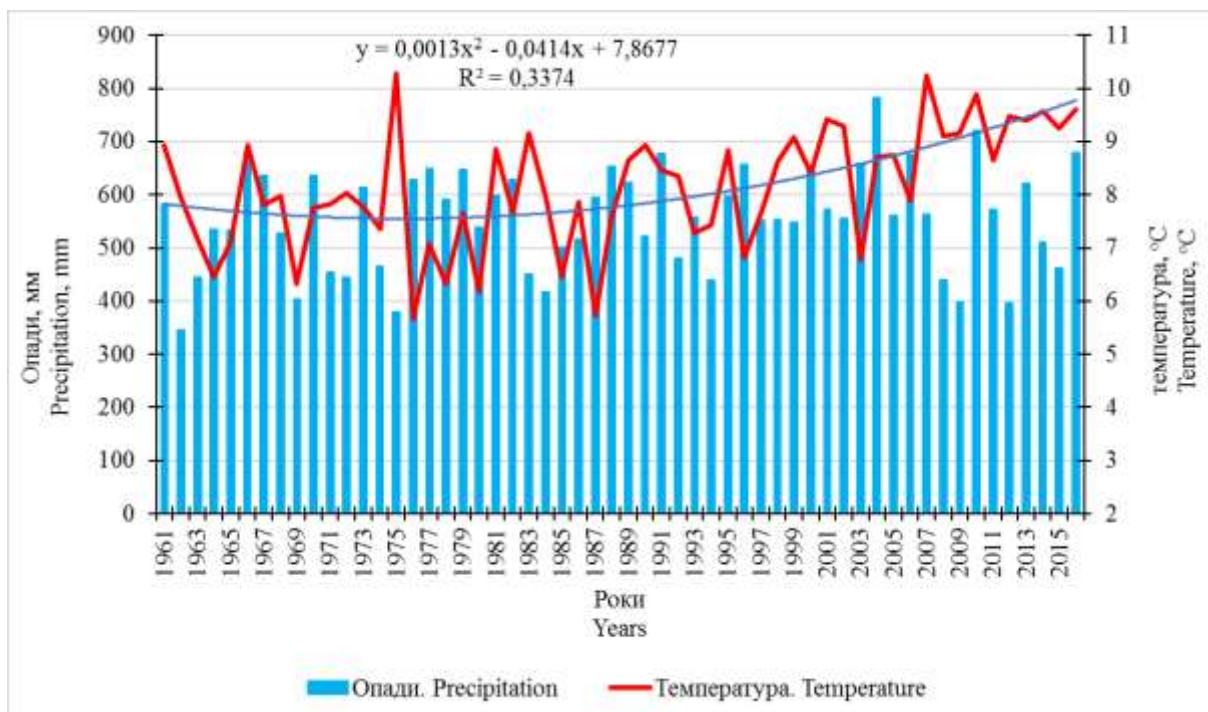


Рис. 1 – Динаміка середніх температур та сум опадів за гідрологічний рік за даними Харківської метеостанції

Fig. 1 – Dynamics of average temperatures and amounts of precipitation for the hydrological year according to the data of the Kharkiv weather station

Між локальними деревно-кільцевими хронологіями дубу та сосни виявлена висока синхронність ($r=0,71\pm 0,07$, $\alpha_{0,05}=0,001$). Встановлено загальні роки мінімального приросту для обох хронологій: 1930, 1969, 1969, 1975-1975, 1976, 2009, та 2012 рр. і максимального приросту: 1941, 1958, 1967, 1971, 1998 рр. У роки депресії

радіального приросту дерев опадів спостерігалось менше на 27-32% від норми, а температури перевищували норму на 22-26%. При цьому норма опадів за 1960-2016 рр. становила 555 мм, а для температур – 8,1°C. Роки максимального приросту характеризувалися сприятливим для росту дерев теплом та вологою (рис. 1, 2).

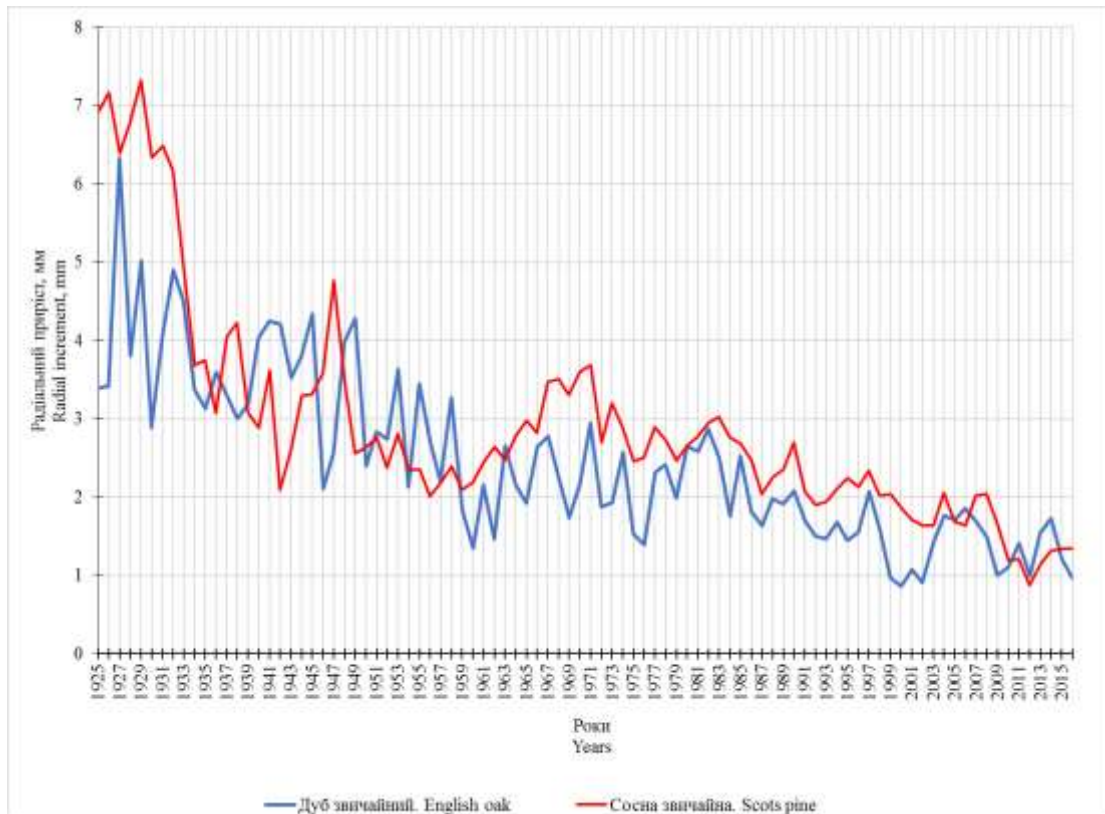


Рис. 2 – Динаміка локальних деревно-кільцевих хронологій дуба звичайного та сосни звичайної в насадженнях Лівобережного Лісостепу

Fig. 2 – Dynamics of local tree-ring chronologies of English oak and Scots pine in the stands of the Left Bank Forest Steppe

Проведено кореляційний аналіз між індексами ранньої, пізньої, річної деревини та гідротермічними показниками, який. Найменш чутливою до гідротермічного режиму виявилася рання деревина для деревно-кільцевої хронології дуба звичайного порівняно з пізньою та ранньою деревиною. Сосна виявилася більш чутливою до кліматичних варіацій порівняно з дубом, про що свідчить найбільша кількість значущих зв'язків між індексами радіального приросту та гідротермічними коефіцієнтами (табл. 1).

Як для дуба звичайного, так і для сосни звичайної виявлено, що чутливість

насаджень у 1998-2016 рр. збільшилася порівняно з попереднім періодом (1960-1987 рр.), про що свідчать значущі кореляції між індексами деревно-кільцевими хронологіями. Найбільш інформативним гідротермічним показником виявився ГТК Селянинова, який виявив значущий вплив температур та опадів упродовж вегетаційного періоду на пізню та річну деревину упродовж 1987-2016 рр., водночас для сосни цей вплив встановлено у першому періоді (1960-1987 рр.) для ранньої деревини та у другому періоді для ранньої та річної

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляції між індексами ранньої та пізньої та річної деревини дуба звичайного і сосни звичайної і гідротермічними коефіцієнтами

Table

Correlation coefficients between indices of early and late and annual wood of English oak and Scots pine wood and hydrothermal coefficients

Індекси деревно-кільцевих хронологій Indexes of tree-ring chronologies	Гідротермічний коефіцієнт де Мартонне за квітень-вересень Hydrothermal coefficient of de Martonne for April-September			
	Дуб звичайний English oak		Сосна звичайна Scots pine	
	1960-1987 pp.	1988-2016 pp.	1960-1987 pp.	1998-2016 pp.
Пізня деревина Late wood	-0,19	0,39	0,19	0,39*
Рання деревина Early wood	-0,18	0,14	0,18	0,07
Річна деревина Annual wood	-0,24	0,38*	0,24	0,32
ГТК (гідротермічний коефіцієнт) Селянінова GTK (hydrothermal coefficient) Selyaninov				
Пізня деревина Late wood	0,21	0,39*	0,32	-0,03
Рання деревина Early wood	-0,24	0,14	0,39*	0,54*
Річна деревина Annual wood	0,15	0,38*	0,07	0,44*
Індекс аридності лісів, ІАЛ Forestry Aridity Index, FAI				
Пізня деревина Late wood	0,02	0,33	0,04	0,38*
Рання деревина Early wood	0,01	0,05	0,42*	0,19
Річна деревина Annual wood	0,01	0,30	0,32	0,13
Гідротермічний коефіцієнт O ₁ Hydrothermal coefficient O ₁				
Пізня деревина Late wood	0,35	0,43*	-0,41*	-0,18
Рання деревина Early wood	0,12	0,01	-0,01	-0,32
Річна деревина Annual wood	0,29	0,35	-0,45*	0,07

Примітка: * – достовірність на рівні 0,05 значущості

Note: * – significance at the 0.05 level

Гідротермічний коефіцієнт O₁, який відображає гідротермічні умови з жовтня попереднього року по вересень поточного, показав, що чутливість дубу до варіацій клімату у другому періоді збільшилася. Щодо сосни – то необхідно зауважити, що у першому періоді цей вплив виявився значущим негативним, а у другому періоді цей вплив пом'якшився.

Проведено кореляційний аналіз між деревно-кільцевими хронологіями всіх видів деревини та відносною вологістю за квітень-серпень, за гідрологічний рік, за холодний період (листопада попереднього року по

березень поточного). Встановлено, що позитивний вплив відносної вологості для дубу звичайного спостерігався для пізньої та річної деревини, а також для пізньої деревини сосни звичайної у 1962-1987 pp. У наступних 1998-2016 pp. ці позитивні кореляції стали незначущими, тобто позитивний вплив відносної вологості зменшився. Для відносної вологості За холодний період значущого впливу відносної вологості на радіальний приріст не встановлено, водночас знайдено позитивний вплив температур на пізню деревину сосни для першого періоду (табл. 2).

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції між індексами ранньої та пізньої та річної деревини дубу звичайного і сосни звичайної і відносною вологістю

Table 2

Correlation coefficients between indices of early and late and annual wood of English oak and Scots pine wood and relative humidity

Індекси деревно-кільцевих хронологій Indexes of tree-ring chronologies	Відносна вологість за квітень-серпень Relative humidity for April-August			
	Дуб звичайний English oak		Сосна звичайна Scots pine	
	1962-1987 pp.	1988-2016 pp.	1962-1987 pp.	1998-2016 pp.
Пізня деревина Late wood	0,47*	0,35	0,54*	0,17
Рання деревина Early wood	0,09	0,18	-0,04	0,32
Річна деревина Annual wood	0,43*	0,35	0,37	0,40
Відносна вологість за гідрологічний рік Relative humidity for hydrological year				
Пізня деревина Late wood	0,37	0,34	0,51*	0,15
-0,04 Рання деревина 0,51* Early wood	-0,04	0,09	-0,04	0,11
Річна деревина Annual wood	0,33	0,31	0,39	0,28
Відносна вологість за холодний період (з листопада попереднього року по березень поточного року) Relative humidity during the cold period (from November of the previous year to March of the current year)				
Пізня деревина Late wood	0,35	0,33	0,14	0,12
Рання деревина Early wood	0,16	0,15	0,02	-0,03
Річна деревина Annual wood	0,30	0,35	0,17	0,11

Обговорення

Посуха згадується як основна проблема в букових лісах Сербії, тому проведена ідентифікація посух за допомогою індексу лісової посушливості (FAI), щоб дослідити їх вплив на ліси в Сербії. Виявлено статистично значущий зв'язок між FAI та шириною кілець для бука звичайного (*Fagus Sylvatica* L.). В наших дослідженнях виявлено позитивний зв'язок між FAI і ранньою та пізньою деревиною сосни, а в дослідженнях сербських вчених – вплив на приріст дерев виявився негативним [14].

Дослідження деревно-кільцевих хронологій *Pinus nigra* (Болгарія) [15] виявили чутливість до літньої посухи та підвищення

літніх температур як в рік формування річного кільця, так і попереднього року. При цьому дослідженні використано гідротермічний коефіцієнт Пальмера. В наших дослідженнях виявлено зміну чутливості радіального приросту дерев до клімату за допомогою гідротермічних коефіцієнтів Селянинова, де Мартонне та клімату аридності лісів. Виявлено, що у 1988-2016 pp. порівняно з 1960-1987 pp. збільшилася чутливість до співвідношення тепла та вологи в поточному році формування річного кільця. При цьому більш чутливою до зміни клімату виявилася сосна в порівнянні з дубом. Погодні умови попереднього року та поточного відображає

коефіцієнт O_1 , який показав, що чутливість шарів пізньої деревини дубу збільшилася у другому періоді порівняно з першим, а для сосни навпаки – зменшилася.

Khaleghi M.R. [12] з Ірану обчислив індекс де Маргонне для вивчення впливу посух на радіальний приріст дерев для періоду з березня по вересень. В наших дендрокліматичних дослідженнях ми теж успішно використали цей індекс для вегетаційного періоду (упродовж квітня-серпня). Водночас річні дані застосовані для обчислення цього індексу не змогли виявити суттєвий вплив цього показника на радіальний приріст дерев.

Індексні деревно-кільцеві хронології *Pinus tabulaeformis* позитивно корелюють з опадами та відносною вологістю, але негативно корелюють з температурою упродовж вегетаційного періоду. Відносна вологість контролюється кількістю опадів і температурою [16]. Ми теж отримали позитивний вплив відносної вологи на сосну і дуб

упродовж першого періоду, у другому періоді цей зв'язок послабився.

Аналіз реакції між шириною деревного кільця та кліматичними змінними був застосований для виявлення змін у реакції дерев шляхом порівняння двох 25-річних періодів на окремих ділянках лісу в Баварії (Німеччина) [17]. Результати показали, що сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) виявилася найбільш вразливою та найменш посухостійкою з усіх досліджених порід дерев (вивчалися ялина звичайна (*Picea abies*) і бук звичайний (*Fagus sylvatica*). В наших дослідженнях кореляційний аналіз радіального приросту дерев з гідротермічними коефіцієнтами виявив, що сосна більш чутлива до посух порівняно з дубом. Всі породи дерев виявили вищу чутливість до посухи за останні 25 років. Кореляції з добовими кліматичними змінними підтвердили, що навіть короточасні погодні умови можуть сильно вплинути на радіальний ріст дерев [17].

Висновки

Дендрокліматичний аналіз *Pinus sylvestris* L. та *Quercus robur* L. показав, що при порівнянні відгуку радіального приросту дерев до варіацій клімату у 1960-1987 рр. та 1988-2016 рр., стан як сосни так і дуба послабився, про що свідчить збільшення чутливості яке виражається у значущих коефіцієнтів кореляції між індексами радіального приросту і кліматичними чинниками. Найбільш інформативним гідротермічним коефіцієнтом виявився коефіцієнт Селянинова.

Сосна виявилася більш чутливою до зміни клімату порівняно з дубом. Водночас як дуб, так і сосна на даному етапі змогли адаптуватися до зміни клімату, про що свідчать деревно-кільцеві хронології, які показують стабільний приріст упродовж 2010-2016 рр.

Автори вдячні за змогу обробити кери в лабораторії дендрохронології в Інституті географії при Університеті ім. Фрідріха-Олександра міст Ерлангена та Нюрнберга

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувалися етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Інформація про фінансування

Дослідження виконане за проектом «Radial growth of Scots pine and Scots oak in the Forest Steppe of Ukraine» із грантовою підтримкою Університету ім. Фрідріха-Олександра міст Ерлангена та Нюрнберга

Список використаної літератури

1. Debel, A, Meier, W.J., Bräuning, A. Climate Signals for Growth Variations of *F. Sylvatica*, *P. abies*, and *P. Sylvestris* in Southeast Germany over the Past 50 Years. *Forests*. 2021. Vol.12. N 11. 1433. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12111433>
2. BhuyanU., Zang Ch., Menzel A. Different responses of multispecies tree ring growth to various drought indices across Europe. *Dendrochronologia*. 2017. Vol. 44. P.1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.02.002>

3. Whitfill M. Europe Warming Faster Than Any Other Continent, Report Suggests Forbes. 2023. Retrieved from: <https://www.forbes.com/sites/maryroeloffs/2023/06/19/europe-warming-faster-than-any-other-continent-report-suggests/>
4. Tkach, V. P., Vysotska, N. Yu, Torosov, A. S., Buksha, I. F., Pasternak, V. P., Los, S. A., Kobets O. V., Tarnopil'ska, O. M., Tarnopil'skyi, P. B., Kalashnikov, A. O., Zhezhkun, I. M., Koval, I. M., Sydorenko, S. G., Sydorenko, S. V., Bondarenko, V. V., Bondar, O. B. Economic evaluation of ecosystem services of forests of Ukraine: Scientific publication Kharkiv: URIFFM, 2023. 28 p. DOI: [10.33220/2023.978-617-8195-57-1](https://doi.org/10.33220/2023.978-617-8195-57-1)
5. Steckela, M., del Riob, M., Heyma, M., Aldead, J., Bielake, K., Pretzsha, H. Species mixing reduces drought susceptibility of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Site water supply and fertility modify the mixing effect. *Forest Ecology and Management*, 2020. Vol. 461. 117908. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117908>
6. Gavrilov, M.B, An, W., Xu, C., Radaković, M.G., Hao, Q., Yang, F., Guo, Z., Perić, Z., Gavrilov, G., & Marković, S.B. Independent Aridity and Drought Pieces of Evidence Based on Meteorological Data and Tree Ring Data in Southeast Banat, Vojvodina, Serbia. *Atmosphere*. 2019. Vol. 10. N 10 P.586. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10100586>
7. Kastridis, A., Kamperidou, V. and Stathis, D. Dendroclimatological Analysis of Fir (*A. borisii-regis*) in Greece in the frame of Climate Change Investigation. *Forests* 2022. Vol.13. N 6. 879. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13060879>
8. Novak, A. A. Kopyi, S. L., Agii, V. O. Some features of radial growth of phenological forms of common oak (*Quercus Robur* L.) in the Western Forest-steppe of Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2022, Vol.32 N 4. P. 7-11. DOI: <https://doi.org/10.36930/40320401> (in Ukrainian).
9. Romanenko, V. A., & Kovalevskyi, S. B. (2023). Influence of climate change on the radial growth of Scots pine in Forest Stands of the Boyarka Forest Research Station. *Scientific Bulletin of UNFU*. Vol. 33. N 5. P. 40-45. DOI: <https://doi.org/10.36930/40330505> (in Ukrainian).
10. Коваль І. М., Браунинг А. Вплив клімату на радіальний приріст дуба звичайного в насадженні Лівобережного лісостепу, *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2018*: зб. тез доповідей XXI Міжнародної науковопрактичної конференції, (Харків, 18-20 квітня 2018 року). Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2018. с. 100-102 URL: https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2019/12/tezi-hhii_mezhd-konf-2018.pdf
11. Koval, I. M., Bräuning, A., Melnik E. E., & Voronin, V. O. Dendroclimatological research of scots pine in stand of the Left-bank Forest-steppe of Ukraine. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2017. № 3-4 (28), С.66–73. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2017-28-07>
12. Khaleghi, M.R. Application of dendroclimatology in evaluation of climatic changes. *Journal of Forest Science*. 2018. Vol.64. N 3. P.139-147 pp. DOI: <https://doi.org/10.17221/79/2017-JFS>
13. Speer, Ja. H. Fundamentals of Tree-Ring Research. Research – Tucson: University of Arizona Press. 2010. 368 pp. Retrieved from: <https://archive.org/details/fundamentalsoftr0000speer>
14. Stjepanović, S., Miletić, B., Drašković, B., Tunguz, V. The impact of climate change on the growth of European beech at optimal altitudes in the Republic of Srpska, *Topola*. 2021. 207. P.5-10. DOI: <https://doi.org/10.5937/topola2101005S>
15. Shishkova V., Panayotov M. Climate-growth relationship of *Pinus nigra* tree-ring width chronology from the Rhodope mountains, *Bulgaria Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2013. Vol.19. N 2. P.225–228. Retrieved from: <https://www.agrojournal.org/19/02-56s.pdf>
16. Sun Ch., Li Q., Liu Yu., Song H., Fangm C., Cai, Qi., Ren, M., Ye Ju., Riochi, L., & Sun Ju. Tree rings reveal changes in the temperature pattern in eastern China before and during the Anthropocene. *Environmental Research Letters*. 2022. Vol. 17. N 12. 124034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca68e>
17. Bräuning, A. De Ridder, M. Zafirov, N, García-González, I., Dimitrov, D.P., Gärtner, H (2016). Tree-ring features: indicators of extreme event impacts, *IAWA Journal*, 37 (2), 206–231. DOI: <https://doi.org/10.1163/22941932-20160131>

Стаття надійшла до редакції 20.04.2024

Стаття рекомендована до друку 27.05.2024

I. M. KOVAL, DSc (Agriculture), Senior Researcher,
Senior Researcher of Forest Ecology Section of Department of Forestry and Forest Economics¹
Professor of the Department of Environmental Monitoring and Protected Area²
e-mail: Koval_Iryna@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>

¹Ukrainian research institute of forestry and forest melioration named after G.M. Vysotsky
86, str. Hryhoriy Skovoroda, Kharkiv, 61024, Ukraine

²V. N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

A. BRÄUNING, DSc (Geography), Prof.,
Professor of Department of Geography and Earth Sciences
e-mail: achim.braeuning@fau.de ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3106-4229>
Institute of Geography, Friedrich -Alexander-Universität Erlangen - Nürnberg
Wetterkreuz 15, 91058 Erlangen, Germany

THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE RADIAL GROWTH OF *PINUS SYLVESTRIS* L. AND *QUERCUS ROBUR* L. IN THE STANDS OF KHARKIV GREEN ZONE

Purpose. To identify the characteristics of the reaction of the radial growth of Scots pine (*Pinus Sylvestris* L.) and Scots oak (*Quercus robur* L.) to climate change in the forest-steppe zone of Ukraine.

Methods. Dendrochronological, dendroclimatological, and statistical methods are applied. COFECHA and ARSTAN programs were used.

Results. The study was conducted in 100-year-old stands of English oak and Scots pine in the Southern Forestry (Left-bank Forest-steppe). The reaction of the radial growth of trees to climate changes was compared for 1960-1987 and 1988-2016. For the dendroclimatic analysis, the de Martonne hydrothermal indices, the Selyaninov hydrothermal coefficient, the forest aridity index, and the O₁ hydrothermal coefficient were used. Relative humidity indicators, which are derived from temperature and precipitation, were also used. It was found that in the second period, the sensitivity of the reaction of the radial growth of trees to climate variations increased, which indicates a certain weakening of the stands due to the increase in temperature. Dendroclimatic analysis of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus robur* L. showed that when comparing the response of the radial growth of trees to climate variations in 1960-1987 and 1988-2016, the condition of both pine and oak weakened, as evidenced by an increase in significant coefficients correlations between growth indices and climatic factors.

Conclusions. Pine was found to be more sensitive to climate change compared to oak. At the same time, these species of these trees at this stage were able to adapt to climate change, as evidenced by tree-ring chronologies, which show stable growth during 2010-2016.

KEY WORDS: English oak, Scots pine, climate change, hydrothermal coefficients, relative humidity

Funding information

The research was carried out under the project "Radial growth of Scots pine and Scots oak in the Forest Steppe of Ukraine" with the grant support of the Institute of Geography, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen -Nürnberg

Referenses

1. Debel, A, Meier, W.J., Bräuning, A. (2021). Climate Signals for Growth Variations of *F. Sylvatica*, *P. abies*, and *P. Sylvestris* in Southeast Germany over the Past 50 Years. *Forests*, 12 (11), 1433. <https://doi.org/10.3390/f12111433>
2. Bhuyan, U., Zang, Ch., Menzel, A. (2017). Different responses of multispecies tree ring growth to various drought indices across Europe, *Dendrochronologia*, 44, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.02.002>
3. Whitfill M. (2023, Jun 19). Europe Warming Faster Than Any Other Continent, Report Suggests. *Forbes*. Retrieved from: <https://www.forbes.com/sites/maryroeloffs/2023/06/19/europe-warming-faster-than-any-other-continent-report-suggests/>
4. Tkach, V. P., Vysotska, N. Yu, Torosov, A. S., Buksha, I. F., Pasternak, V. P., Los, S. A., Kobets O. V., Tarnopilska, O. M., Tarnopilskyi, P. B., Kalashnikov, A. O., Zhezhkun, I. M., Koval, I. M., Sydorenko, S. G., Sydorenko, S. V., Bondarenko, V. V., Bondar, O. B. (2023). Economic evaluation of ecosystem services of forests of Ukraine: Scientific publication Kharkiv: URIFFM. DOI: [10.33220/2023.978-617-8195-57-1](https://doi.org/10.33220/2023.978-617-8195-57-1)
5. Steckela, M., del Riob, M., Heyma, M., Aldead, J., Bielake, K., Pretzsch, H. (2020). Species mixing reduces drought susceptibility of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Site water supply and fertility modify the mixing effect. *Forest Ecology and Management*, 461, 117908, 1127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117908>

6. Gavrillov, M.B, An, W., Xu, C., Radaković, M.G., Hao, Q., Yang, F., Guo, Z., Perić, Z., Gavrillov, G., & Marković, S.B. (2019). Independent Aridity and Drought Pieces of Evidence Based on Meteorological Data and Tree Ring Data in Southeast Banat, Vojvodina, Serbia. *Atmosphere*, 10 (10), 586. <https://doi.org/10.3390/atmos10100586>
7. Kastridis, A., Kamperidou, V. & Stathis, D. (2022). Dendroclimatological Analysis of Fir (*A. borisii-regis*) in Greece in the frame of Climate Change Investigation. *Forests*, 13(6), 879. <https://doi.org/10.3390/f13060879>
8. Novak, A. A. Kopyi, S. L., Agii, V. O. (2022). Some features of radial growth of phenological forms of common oak (*Quercus Robur L.*) in the Western Forest-steppe of Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*. 32 (4), 7-11. <https://doi.org/10.36930/40320401> (in Ukrainian).
9. Romanenko, V. A., & Kovalevskiy, S. B. (2023). Influence of climate change on the radial growth of Scots pine in Forest Stands of the Boyarka Forest Research Station. *Scientific Bulletin of UNFU*, 33(5), 40-45. <https://doi.org/10.36930/40330505> (in Ukrainian).
10. Koval I. M., Bräuning A. The influence of climate on the radial growth of common oak in the plantation of Livoberezhny Forest Steppe. *Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference "Ecology, Environmental Protection and Balanced Nature Management: Education - Science - Production - 2018"* April 18-20, 2018, 100-102. Retrieved from <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2019/12/tezi-hhii mezhd-konf-2018.pdf> (in Ukrainian).
11. Koval, I. M., Bräuning, A., Melnik E. E., & Voronin, V. O. (2017). Dendroclimatological research of scots pine in stand of the Left-bank Forest-steppe of Ukraine. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (3-4 (28)), 66–73. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2017-28-07>
12. Khaleghi, M.R. (2018). Application of dendroclimatology in evaluation of climatic changes. *Journal of Forest Science*, 64 (3), 139-147. <https://doi.org/10.17221/79/2017-JFS>
13. Speer, Ja. H. (2010). *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Research – Tucson: University of Arizona Press. 368 pp. Retrieved from <https://archive.org/details/fundamentalsoftr0000speer>
14. Stjepanović, S., Miletić, B., Drašković, B., Tunguz, V. (2021). The impact of climate change on the growth of European beech at optimal altitudes in the Republic of Srpska. *Topola*, 207, 5-10. <https://doi.org/10.5937/topola2101005S>
15. Shishkova, V. & Panayotov, M. (2013). Climate-growth relationship of *Pinus nigra* tree-ring width chronology from the Rhodope mountains. *Bulgaria Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 19 (2), 225–228. Retrieved from: <https://www.agrojournal.org/19/02-56s.pdf>
16. Sun, Ch., Li, Q., Liu, Yu., Song, H., Fangm C., Cai, Qi., Ren, M., Ye, Ju., Riochi.L., & Sun, Ju. (2022). Tree rings reveal changes in the temperature pattern in eastern China before and during the Anthropocene. *Environmental Research Letters*, 17 (12), 124034. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca68e>
17. Bräuning, A. De Ridder, M. Zafirov, N, García-González, I., Dimitrov, D.P., & Gärtner, H (2016). Tree-ring features: indicators of extreme event impacts. *IAWA Journal*, 37 (2), 206–231. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160131>

The article was received by the editors 20.04.2024

The article is recommended for printing 27.05.2024