

Вплив кліматичних чинників на радіальний приріст *Tilia cordata* (*Malvaceae* s. l. / *Tiliaceae* s. str.) у лісових біотопах Києва

Юлія С. ПРОКОПУК, Сергій М. КОНЯКІН, Максим В. НЕЦВЕТОВ

Інститут еволюційної екології НАН України
вул. акад. Лебедєва 37, Київ 03143, Україна
disfleur76@live.fr
ju.prokopuk91@gmail.com
ser681@ukr.net

Prokopuk Yu.S., Koniakin S.N., Netsvetov M.V. 2020. **Climate variables governing the growth of *Tilia cordata* (*Malvaceae* s. l. / *Tiliaceae* s. str.) in forest biotope in Kyiv.** *Ukrainian Botanical Journal*, 77(4): 294–304.

Abstract. The green belt of Kyiv includes several rare forest biotopes ringing the city and experiencing numerous disturbances and stressors derived from both urbanization processes and climate changes. The arboreal species perform multiple ecological functions and influence overall forested ecosystems vulnerability to natural or anthropogenic factors. We have developed the radial growth chronology of *Tilia cordata*, a common native species in Ukraine, to investigate its climate sensitivity in an urban forest in Kyiv. We assessed relationships between the radial growth of seven trees and hydrothermal variables derived from daily data sets aggregated in intervals from 14 to 180 days instead of the conventional monthly resolution. The studied trees demonstrated a weak intercorrelation, but high subsample signal strength allowed us to perform further analysis. The overall analyses spanned common for all studied trees chronologies period 1977–2015 shows that precipitation governed the growth of *Tilia cordata* in Kyiv's forest, and the influence was significant in the interval between December of the resting period and May in the growing season. Temperatures averaged for March–May of the prior growth period had a weaker but significant negative impact on *Tilia cordata* growth. The co-inertia analysis shows that despite low intercorrelation between trees chronologies, individual growth patterns highly correlated with growth-to-climate relationships patterns suggesting that precipitations synchronized trees growth even in various microsites conditions of the studied forest. The age of the oldest studied trees, which had a mean growth rate of 0.95 mm per year, reached 300 years.

Keywords: growth-climate relationships, growth pattern, growth rate, small-leaved lime, tree ring

Submitted 07 April 2020. Published 31 August 2020

Прокопук Ю.С., Конякін С.М., Нецветов М.В. 2020. **Вплив кліматичних чинників на радіальний приріст *Tilia cordata* (*Malvaceae* s. l. / *Tiliaceae* s. str.) у лісових біотопах Києва.** *Український ботанічний журнал*, 77(4): 294–304.

Реферат. У зеленій зоні міста Києва збереглося декілька рідкісних лісових біотопів, які наразі зазнають впливу антропогенних стресових факторів на тлі змін клімату. Одним із шляхів спостереження за станом та змінами у лісових екосистемах є регулярне проведення дендроіндикаційних досліджень. У даній роботі ми побудували дендрохронологічну серію *Tilia cordata*, щоб дослідити її чутливість до кліматичних чинників у лісових біотопах Києва. Нами встановлено залежність радіального приросту семи дерев від щоденних гідротермічних змінних з інтервалом 14–180 днів. Виявлено, що впродовж 1977–2015 рр. у лісах Києва радіальний приріст *T. cordata* обмежували опади, їхній вплив був значущим з грудня попереднього року (період спокою) до травня поточного року (період вегетації). Температура повітря у березні–травні попереднього вегетаційного періоду мала менший, але значущий негативний вплив на приріст *T. cordata*. Вік найстаріших досліджуваних дерев, середній радіальний приріст яких становив 0,95 мм на рік, сягає 300 років. Радіальний приріст наймолодших досліджених дерев віком близько 70 років варіює від 2,70 мм на рік у лісовому масиві до 3,34 мм – на відкритому просторі. Середній радіальний приріст досліджених дерев становить $2,11 \pm 0,936$ мм на рік.

Ключові слова: липа серцелиста, приріст, річні кільця, чинники навколишнього середовища



Рис. 1. Картохсхема поширення *Tilia cordata* (<http://www.euforgen.org/species/tilia-cordata/>) та місце відбору даних
 Fig. 1. Distribution map of *Tilia cordata* (<http://www.euforgen.org/species/tilia-cordata/>). The circle refers to the study site in Kyiv, Ukraine

Вступ

У сучасних межах Києва збереглося кілька рідкісних лісових біотопів – прирічкових та заплавних лісів із домінуванням *Salix alba* L., *S. fragilis* L., *Populus nigra* L., *P. tremula* L.; заплавних дібров; лісів із *Quercus robur* L., *Fraxinus excelsior* L., *Carpinus betulus* L.; ясенєво-дубових лісів із *Allium ursinum* L. та лісів із сосною звичайною, що включені до Резолюції Бернської конвенції, Зеленої книги України, Директиви з охорони біотопів (Aloshkina, 2011). Наразі по всьому світу міські ліси потерпають від дії антропогенних стрес-факторів унаслідок процесів урбанізації, що відбуваються на тлі глобальних кліматичних змін. Відповідні зміни в лісових біотопах значною мірою залежать від реакції основних деревних видів, які відіграють ключову

роль у структурі та функціонуванні фітоценозів та екосистем, на подібні процеси (Ellison et al., 2005).

Серед видів деревних рослин у лісових біотопах Києва одним із найменш вивчених є *Tilia cordata* Mill. (*Malvaceae* s. l. / *Tiliaceae* s. str.), який має важливе екологічне значення: є джерелом живлення для багатьох тварин; може мати ярусну будову кореневої системи й залучає у біологічний кругообіг мінерали та поживні речовини з різних шарів ґрунту; сциогеліофіт, здатний рости в другому ярусі, створюючи тіньові умови в лісі; невибагливий до ґрунтів і покращує їхню фертильність унаслідок ясного опадів (Radoglou et al., 2008). Завдяки цим властивостям та відносно високій стійкості до забруднення ґрунту й повітря види роду *Tilia* є важливою складовою міських насаджень (Masalskyi, Mordatenko, 2014; Nebesnyi et al., 2016; Lykholat et al., 2016; Sovakov et al., 2017).

В Україні проходить південна межа природного поширення *T. cordata*, проте Київ розташований углибині ареалу (рис. 1), де цей вид представлений здебільшого в лісах із *Quercus robur*, *Fraxinus excelsior*, *Carpinus betulus*. Ці лісові біотопи поширені у правобережній частині Києва, де *T. cordata* входить до асоціації *Tilio cordatae-Carpinetum* Tkaczyk 1962 та здебільшого представлена старими особинами (Solomakha, 2008; Dubyna et al., 2019), що дає змогу побудувати хронологію приросту деревини, достатню для достовірної оцінки його реакції на варіації кліматичних чинників.

Більшість методів, що використовуються в дендроіндикації (Didukh, 2012), дозволяють отримати інформацію про поточний функціональний стан рослин, і лише при тривалому моніторингу вони показують динаміку його змін. На відміну від них, дендрохронологічні методи дозволяють встановити кореляції приросту з факторами навколишнього середовища в заданий період часу, в т. ч. в минулому, коли дослідження ще не проводились (Lovelius, Grytsan, 1998). Київ є одним із небагатьох міст у світі, де проводяться тривалі і майже безперервні метеорологічні спостереження, тут збереглися старі екземпляри видів деревних рослин, деревину яких можна використовувати як своєрідний природний літопис (Netsvetov et al., 2018). Тим не менш, побудова хронологічних серій радіального приросту *T. cordata* ускладнена як особливостями анатомічної будови річних кілець, так і частою наявністю ушкоджених порожніх стовбурів, через що дендрокліматологічні дослідження цього виду є дуже рідкісними. Наразі нам відомі лише дві опубліковані роботи з дендрохронології *T. cordata* – з лісових біотопів Присамар'я (Lovelius, Grytsan, 1998) та гірських лісів південної Польщі (Barniak et al., 2014); ще в кількох працях досліджено дерева міських насаджень (Moser et al., 2017; David et al., 2018; Moser-Reischl et al., 2019; Helama et al., 2020). На жаль, дані з алейних насаджень та скверів у містах не можуть бути повною мірою застосовані до лісових біотопів, а досліджень, проведених в Польщі та на межі ареалу в Присамар'ї, недостатньо для розуміння, як *T. cordata* в лісах Києва реагує на зміни факторів середовища. Тому в даній роботі ми провели детальний аналіз чутливості *T. cordata* до варіацій кліматичних чинників і визначили середній приріст дерев цього виду в лісових біотопах Києва.

Матеріали та методи

Місце дослідження. Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва загальнодержавного значення "Феофанія" (далі – парк "Феофанія") розташований у південно-західній частині м. Київ. Рельєф долинно-балковий, середня висота 167 м н.р.м., переважають сірі, ясно- та темно-сірі лісові ґрунти (Padun, 1985). Дубово-грабові ліси парку "Феофанія" (з домішкою *Tilia cordata*, *Acer platanoides* L.) представлені двома асоціаціями, зокрема *Galeobdolo lutei-Carpinetum* Shevchuk, Bakalyna & Solomakha 1996 та *Tilio cordatae-Carpinetum* Tkaczyk 1962, які належать до союзу *Carpinion betuli* Issler 1931, порядку *Carpinetalia betuli* P. Fukarek 1968 та класу *Carpino-Fagetea sylvaticae* Jakucs ex Passarge 1968 (Dubyna et al., 2019). Дослідження проводилися в 1- та 2-му кварталах вікової *Querceta roboris*, де зростає найбільша кількість потенційно вікових дерев *T. cordata* зі ступенем товщини 76 см та більше (Klyumenko et al., 2015).

Відбір зразків та побудова хронологічних серій. Загалом досліджено сім дерев *T. cordata* (Тс1–7), з яких шість зростають у лісових ділянках (рис. 2, В) та одне на відкритій ділянці парку (рис. 2, А). З кожного дерева буравом Haglof на висоті 1,3 м було відібрано не менше двох кернів для можливості проведення перехресного датування та виявлення несправжніх кілець та таких, що "випали". Для запобігання пошкодженню стовбура отвори замащували садовим варом. Керни наклеювали на дерев'яну основу, шліфували наждачним папером, поступово зменшуючи зернистість від 80 до 320 одиниць, та сканували на планшетному сканері Epson V33 із роздільною здатністю 3200 dpi. Ширину річних кілець вимірювали в програмі "AxioVision" (Carl Zeiss Microscopy GmbH) з точністю 0,01 мм. Несправжні кільця визначали під мікроскопом МБС–1. Для кращої ідентифікації річних кілець на санному мікротомі МС–2 робили мікрорізи 10–15 мкм завтов., які фарбували сафраніном та альціановим синім (рис. 2, С).

Створення узагальненої хронологічної серії радіального приросту деревини *Tilia cordata*. Аналіз кореляції приросту з кліматичними чинниками. Для кожного дослідженого дерева проводили перехресне датування його зразків-кернів з метою точного визначення календарної дати формування річного кільця. Індивідуальну хронологічну серію радіального приросту створювали шляхом

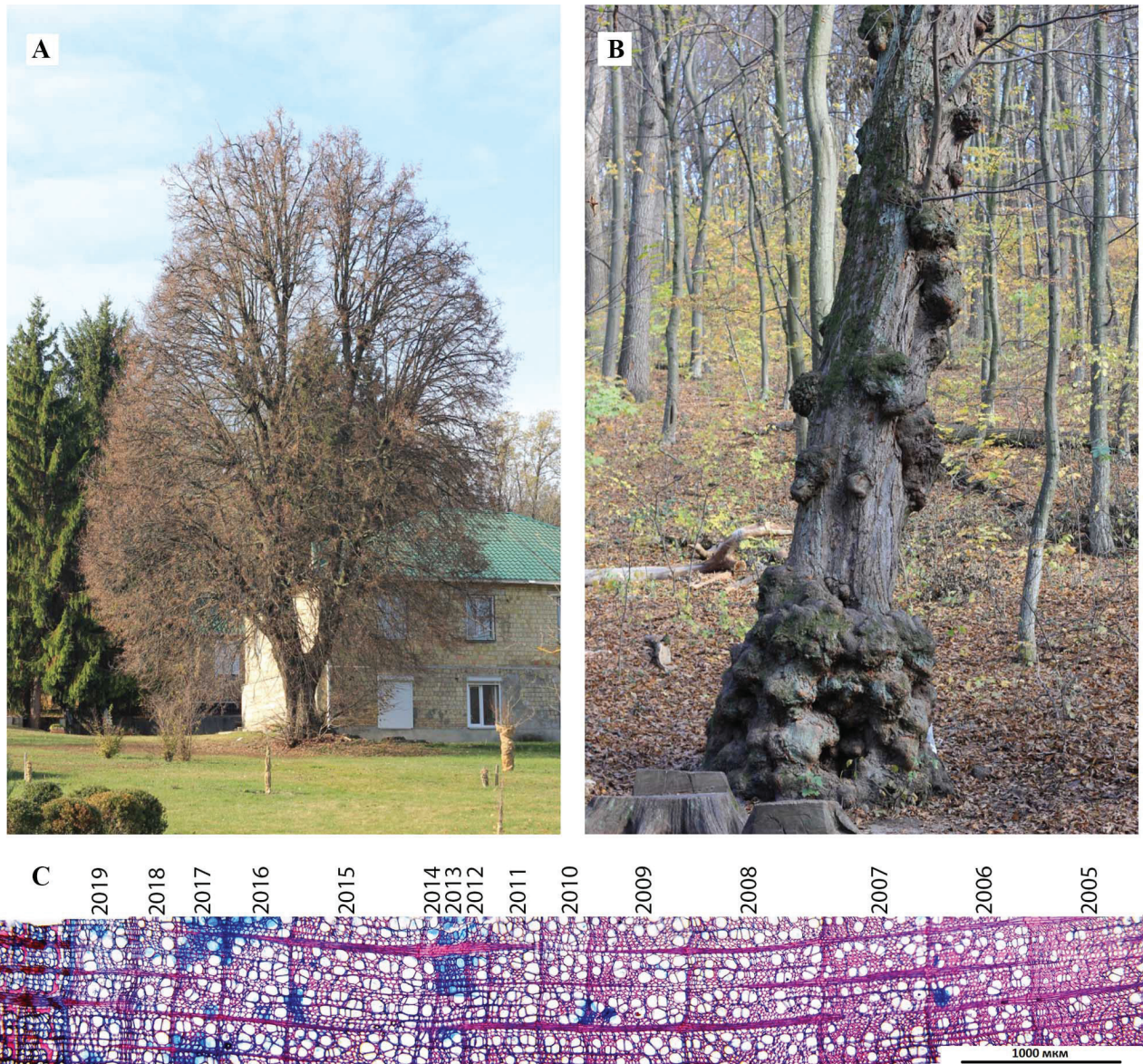


Рис. 2. Деревя *Tilia cordata*, що зростають у парку "Феофанія". А: дерево Тс1 на відкритому місці в парку; В: вікове дерево Тс2 з лісового масиву; С: поперечний мікроріз деревини дерева Тс2 із вузькими річними кільцями та нечіткими межами кілець, сформованими в період 2012–2014 рр.

Fig. 2. *Tilia cordata* trees growing in the Feofania Park in Kyiv. А: the planted tree Тс1 at an open site; В: the old-grown tree Тс2 from below the canopy in the forest stand. С: microsection of the tree Тс2 core with a sequence of narrow rings and unclear boundaries formed in 2012–2014

осереднення даних декількох кернів одного дерева. Якість датування кернів перевіряли у програмі "COFESHA", Version 6.0бр (Holmes, 1983). Узагальнену деревно-кільцеву хронологію було побудовано на основі індивідуальних серій приросту в пакеті "dplR" програмного середовища R.

Аналіз зв'язку приріст–клімат проведено для хронологічних індивідуальних та усередненої Український ботанічний журнал, 2020, 77(4)

серії приросту для періоду 1977–2015 рр., що був спільним для всіх дендрохронологічних серій. Враховували погодні умови двох років – поточного, тобто в якому сформовано кільце, та попереднього. Початком попереднього вегетаційного сезону умовно обрано 6 березня, 65-й день року, що відповідає фазі бубнявіння бруньок, а кінцем – 25 вересня поточного сезону, 633-й день від початку попереднього року –

Таблиця 1. Статистичні показники радіального приросту дерев *Tilia cordata*
Table 1. General statistics of radial growth of *Tilia cordata* trees

Номера дерев	Хронологічний інтервал	Середній приріст, мм	Стандартне відхилення, \pm мм	Коефіцієнт автокореляції	Кореляція з узагальноною серією
Tc1	1977–2015	3,34	1,563	0,425	0,313
Tc2	1919–2019	0,95	0,724	0,618	0,298
Tc3	1945–2018	2,70	0,966	0,389	0,427
Tc4	1943–2018	2,27	2,269	0,909	0,371
Tc5	1867–2018	1,93	0,933	0,563	0,343
Tc6	1940–2019	3,44	1,580	0,600	0,517
Tc7	1944–2019	2,05	1,424	0,852	0,144
Середнє		2,11	0,936	0,627	0,346

настання фази осіннього забарвлення листя. Дати вибрано зважаючи на сезонний ритм розвитку виду для Білої Церкви (Masalskiy, 2010). Обчислення проведено у пакеті "DendroTools" (Jevšenak, Levanič, 2018) з використанням щоденних даних про кількість опадів та середню добову температуру в Києві (European Climate Assessment and Dataset project <https://www.ecad.eu/>). Замість використання місячних середніх температур та суми опадів за допомогою зазначеного пакету ми об'єднали щоденні кліматичні дані в інтервали від 14 до 180 днів з метою виявлення максимальних значень коефіцієнтів кореляції. Результати обчислень представляють матрицю зі стовпцями – днем року, з якого починається інтервал, та рядками – довжиною інтервалу. У графічному представленні результатів враховували тільки статистично значущі коефіцієнти кореляції при $p < 0,05$.

Матриці кореляцій індивідуальних хронологій було використано в подальшому аналізі того, як пов'язані між собою структури вибірки дерев на основі приросту та реакції на кліматичні чинники. Для цього було залучено метод коінерції, реалізований у пакеті "ade4". Метод застосовують для пари матриць, для яких також розраховують міру зв'язку, RV-коефіцієнт та головні осі максимальної варіації, інерції (Draу et al., 2003). У пошуку головних осей для таблиці індивідуальних трансформованих серій приросту використовували метод головних компонент, а для сукупності матриць приросту – послідовно метод головних компонент і дві його трансформації – внутрішньокласовий аналіз для видалення ефекту ширини інтервалу агрегації кліматичних даних та аналіз між класами для виявлення відмінностей

реакцій дерев на кліматичні чинники. Про значущість RV-коефіцієнту судили за значенням p , отриманому при 1000 переставлень методом Монте-Карло (Нео, Gabriel, 1997).

Усі статистичні обчислення проведені в середовищі R (R Core Team, 2020) за власноруч створеними алгоритмами-скриптами.

Результати дослідження

Радіальний приріст *Tilia cordata* та його статистичні параметри. Через ексцентричність приросту та пошкодження центральної частини стовбура дістатися серцевини вдалося лише у дерева Tc3, камбіальний вік якого станом на 2018 рік складав 74 роки. Для решти дерев вік розраховували геометричним методом (Rozas, 2003). Вік Tc1, що росте на відкритій ділянці, становив близько 70 років, вік Tc6, що зростає на лісовій ділянці – близько 83 років. Оцінений вік Tc2 перебуває в межах 299–375 років, Tc4 – у межах 99–102 роки, вік Tc5 та Tc7 становив 158 років та 178 років відповідно.

Середній радіальний приріст досліджених дерев становив $2,110 \pm 0,936$ мм. Найменше середнє значення приросту $0,950 \pm 0,724$ мм встановлено в Tc2, найбільше $3,44 \pm 1,580$ мм – у Tc6 (табл. 1, рис. 3). Коефіцієнт автокореляції, який характеризує, наскільки тісно ширина річного кільця поточного року пов'язана із шириною кільця попереднього року, а також показує вплив умов зростання минулого сезону на приріст поточного, в середньому становив 0,627. Найбільше значення коефіцієнту автокореляції було в Tc4 (0,909), найменше в Tc3 (0,389). Коефіцієнт

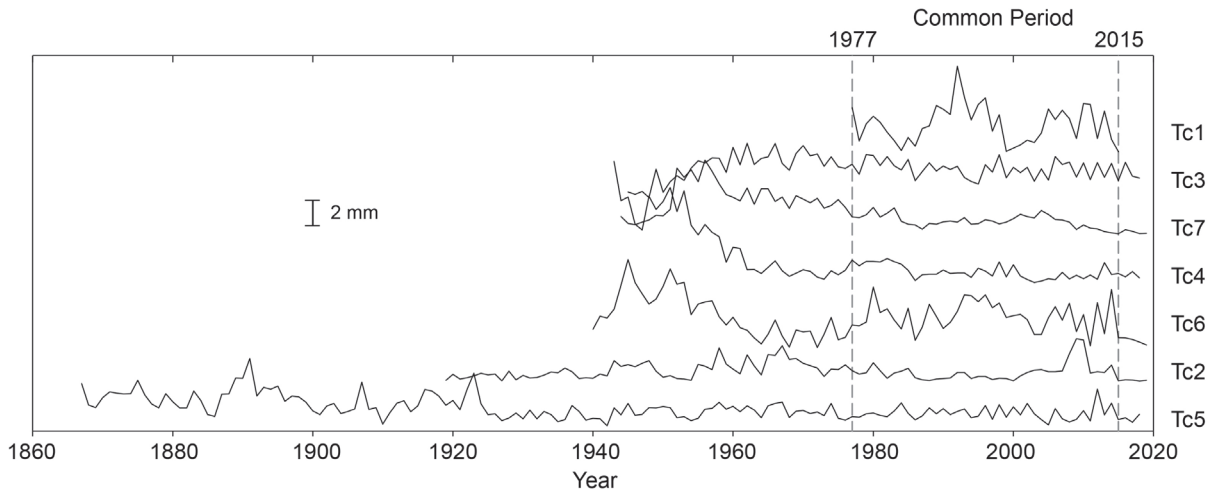


Рис. 3. Хронологічні серії радіального приросту дерев *Tilia cordata*. Пунктирні лінії обмежують спільний інтервал
 Fig. 3. Chronological series of radial growth of *Tilia cordata* trees. Dashed lines denote common interval

кореляції індивідуальних серій з узагальноною становив у середньому 0,346, був найбільшим у Тс6 (0,517), найнижчим – у Тс7 (0,144) (табл. 1).

Середня довжина індивідуальних хронологічних серій становила 85,4 роки, найдовша у Тс5 охоплює 152 роки (1867–2018 рр.), найкоротша у Тс1 – 39 років (1977–2015 рр.). Саме довжина найкоротшої хронологічної серії визначила спільний інтервал для всіх хронологій – 1977–2015 рр. (рис. 3).

Для характеристики індивідуальних хронологій дерев розраховано такі статистичні показники: середня кореляція між деревами ($r_{bar.bt}$), відношення "сигналу до шуму" (snr), виражений популяційний сигнал (eps) та сила сигналу вибірки (sss). Значення показника $r_{bar.bt}$, який вказує на ступінь взаємозв'язку між деревами, становив 0,203. Показник snr , що вказує на потужність сигналу та є показником взаємкореляції індивідуальних хронологій, складає 1,772. Показники eps та sss виражають репрезентативність вибірки і становлять 0,639 та більше 0,850 відповідно.

Кореляція приріст-клімат. Зв'язок приросту дерев з опадами та температурою представлено на рис. 4 у формі теплової карти, на якій колір точок відповідає величині та знаку коефіцієнта кореляції. Аналіз проведено з урахуванням умов сезону росту та попереднього вегетаційного сезону, а також періоду спокою між ними. Дату початку інтервалу узагальнення кліматичних даних позначено на рисунку по горизонталі, ширину цього інтервалу – по

вертикалі. Максимальні кореляції приросту окремих дерев із опадами належали до різних періодів і мали різний знак (див. текстові позначки на рис. 4). Приріст дерев Тс2, Тс5–7 був зворотно пов'язаний з опадами в попередньому році. Тс4 мав найбільшу кореляцію з опадами початку попереднього сезону, а Тс1 і Тс3 – з опадами, що випадали перед або на початку вегетаційного сезону.

Упродовж 1977–2015 рр. опади періоду спокою та початку вегетаційного сезону (13 грудня – 12 квітня), позитивно впливали на радіальний приріст *T. cordata* (див. рис. 4, горизонтальна вісь). Найбільше значення коефіцієнта кореляції (0,574) визначено для суми опадів за 95 діб у період з 12 лютого до 17 травня.

Кореляція приросту з термічним чинником була меншою. Для дерев Тс1–3 і Тс5 встановлено найбільшу позитивну кореляцію приросту із середніми температурами коротких періодів (див. текстові позначки на рис. 4 праворуч): влітку попереднього сезону – Тс1, у період спокою – Тс3, на початку вегетаційного сезону – Тс5, у серпні – Тс2. Максимальні абсолютні коефіцієнти кореляції приросту трьох інших дерев з опадами були негативними: Тс4 і Тс7 корелювали із сумою опадів серпня та жовтня попереднього року, а Тс6 – із опадами кінця поточного вегетаційного сезону. Кореляція усередненої хронології з температурами була негативною і значущою лише для періоду початку вегетаційного сезону попереднього року для інтервалів усереднення від 14 до 70 діб (рис. 4

праворуч). Максимальне значення ($-0,472$) коефіцієнт кореляції мав для 57-денного періоду від 22 березня до 17 травня попереднього сезону росту.

Зв'язок між структурою вибірки досліджених дерев на основі приросту та структурою за реакцією дерев на кліматичні чинники встановлено за аналізом коінерції (рис. 5).

Структуру вибірки за приростом попередньо досліджено методом головних компонент, із яких три перші зберігають 75% варіації. Проекція цих компонент на осі коінерції показана на колах кореляції (рис. 5, А, В), структура за приростом відображена точками на графіку коінерції. Структуру вибірки дерев за їхньою реакцією на гідрологічний та термічний чинники позначено закінченнями стрілок на графіку коінерції. Довжина стрілок на рисунку відповідає зміні положення окремих дерев у структурі вибірки за приростом та реакцією на кліматичні чинники. Висока синхронізація радіального приросту дерев *T. cordata* обумовлена опадами, про що свідчать результати коінерції та RV-коефіцієнт $0,87$ ($p = 0,004$) і $0,72$ ($p = 0,16$) для опадів і температур відповідно.

Обговорення

Вік, радіальний приріст та його статистичні характеристики. Встановлення точного віку дерев роду *Tilia* за підрахунком річних кілець, а також абсолютне датування кернів часто ускладнюються низкою причин (Läänelaid, Sander, 2004). Види роду *Tilia* мають розсіяно-судинний тип деревини, тому межі річних кілець інколи важко розпізнати навіть під мікроскопом. Прикладом цього може слугувати Тс2 у нашому дослідженні, в якого за період 2012–2014 рр. сформувалися вузькі кільця з нечіткими межами (див. рис. 2, С). Крім того, дерева роду *Tilia* часто формують так звані "несправжні" річні кільця або мають кільця, що "випали" (Läänelaid, Sander, 2004). Тому для уникнення помилок під час датування відбирають не менше двох зразків із подальшим їхнім перехресним датуванням. Стовбур у старих лип зазвичай з пустотами, тому керни часто не містять серцевини, а вік доводиться розраховувати непрямими методами (Läänelaid, Sander, 2004). Однак встановлення точного віку видів роду *Tilia* з використанням прямих і непрямих методів інколи обмежується через здатність до формування клонів. Так, клони липи найчастіше не досягають віку зрілості, а тисячоліттями знаходяться на ювенільній

стадії через постійне вегетативне поновлення (Smirnova, Chistyakova, 1980; Pigott, 1992).

У цілому радіальний приріст досліджених *T. cordata* узгоджується з розрахованим віком. Приріст Тс1 та Тс6 віком 70 і 83 років становить $3,34 \pm 1,563$ мм і $3,44 \pm 1,580$ мм, що відповідає середньому приросту *T. cordata* віком 50–100 років у Великій Британії (Moir, Leroy, 2013). Найстарішим деревом виявилось Тс2 з оціненим віком близько 299–375 років. Проте, що Тс2 є багатовіковим, свідчить його середній радіальний приріст $-0,95 \pm 0,724$ мм. Так, оцінений вік дерев *T. × europaea* L., що зростають у Таллінні, становив 265–317 років із середнім приростом $0,83$ мм/рік та 256–339 років із приростом $0,98$ мм/рік (Läänelaid, Sander, 2004).

Нині є декілька створених хронологічних серій радіального приросту *T. cordata* в Європі. Найдовшу хронологію (245 років) побудовано для дерев в Італії, вона охоплює період з 1722 по 1967 рр. (Bernabei, Pollini, 2006), у Великій Британії – дещо коротшу (138 років), з 1866 по 2003 рр. (Moir, Leroy, 2013). Створена нами хронологія в Києві охоплює 153 роки – з 1867 по 2019 рр.

Більшість дендрокліматологічних робіт орієнтується на такий статистичний показник, як виражений сигнал популяції (eps), який показує, наскільки реальна хронологія відображає гіпотетичну, представлену безкінечною кількістю дерев. Загальноприйнятим є те, що при значенні $eps > 0,85$ хронологічний ряд вважається репрезентативним (Wigley et al., 1984; Cook, Kairiukstis, 1990; Buras, 2007). Іншим показником, якому в дендрокліматологічних роботах приділяється менша увага, є сила сигналу вибірки (sss), що, на відміну від eps, показує, наскільки створена хронологія відображає гіпотетичну з обмеженою кількістю дерев та її придатність для подальшого дендрокліматичного аналізу (Wigley et al., 1984; Buras, 2007). Крім того, $sss > 0,85$ вважається критерієм того, що вибірка містить сильний кліматичний сигнал (Wigley et al., 1984). Тому в нашому дослідженні ми керувалися значенням sss, який для спільного інтервалу (1977–2015) дослідженої вибірки перевищив $0,85$. Наявність чіткого кліматичного сигналу в узагальненій хронології підтвердила доцільність застосування sss для попередньої оцінки достатності вибірки.

Зв'язок приросту із кліматом. Незважаючи на труднощі ідентифікації річних кілець, хронологічні серії *T. cordata*, *T. × europaea*, *T. platyphyllos* Scop. та *Tilia tomentosa* Moench були успішно використані в

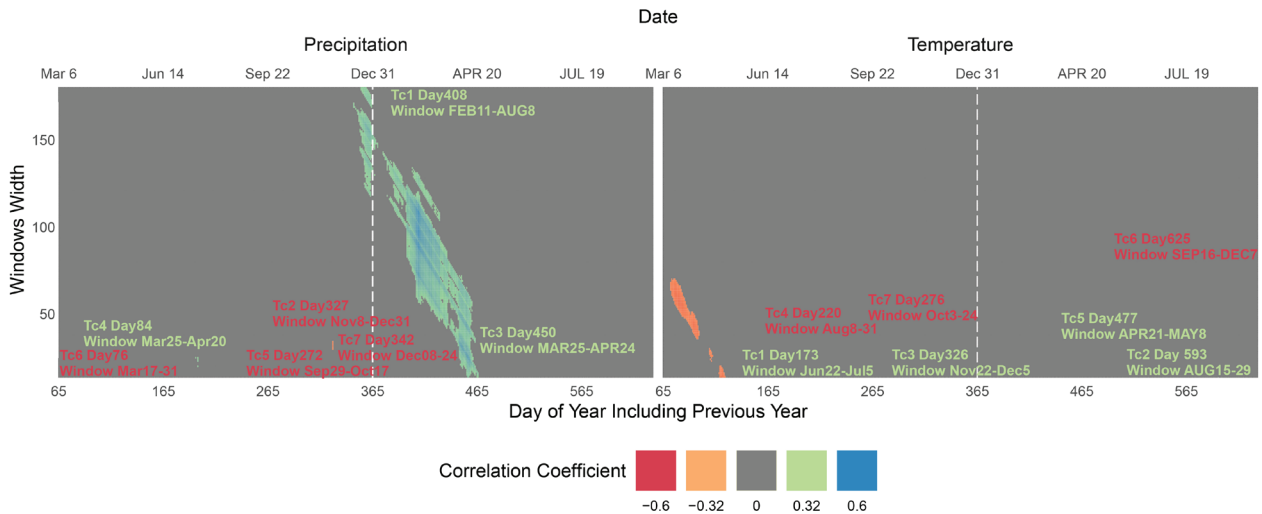


Рис. 4. Кореляція кліматичних чинників та радіального приросту *Tilia cordata* за усередненими даними для всіх (Tc1–7) досліджених дерев. Враховано період з 6 березня попереднього року до 25 вересня поточного. Щоденні дані опадів підсумовано, температури усереднено за період від 14 до 180 діб – відображено на вертикальній осі і позначено Windows Width. Початок досліджуваного періоду показано на горизонтальній осі і позначено Day of year (унизу) та Date (вгорі). Білою пунктирною лінією марковано початок року, протягом якого відбувався ріст деревини. Кольором відзначено лише кореляції, статистично значущі за $p < 0,05$. Аналіз проведено для періоду 1977–2015 рр., що був спільним для хронології приросту всіх досліджених дерев

Fig. 4. The temporal pattern of the growth to climate correlation coefficients derived from composite tree-ring chronology of *Tilia cordata* and climate data at daily resolution aggregating into 14–180 days' windows. The day of year and the date at the x-axes are the starting day of the time window considered in the analysis. White dashed line separates previous and current year, i.e. year of tree-ring formation. Non-significant and 0 correlations coefficients are omitted and filled with gray color. The $p < 0.05$ threshold for correlation coefficient is 0.32 (-0.32). The analysis performed for the common period 1977–2015

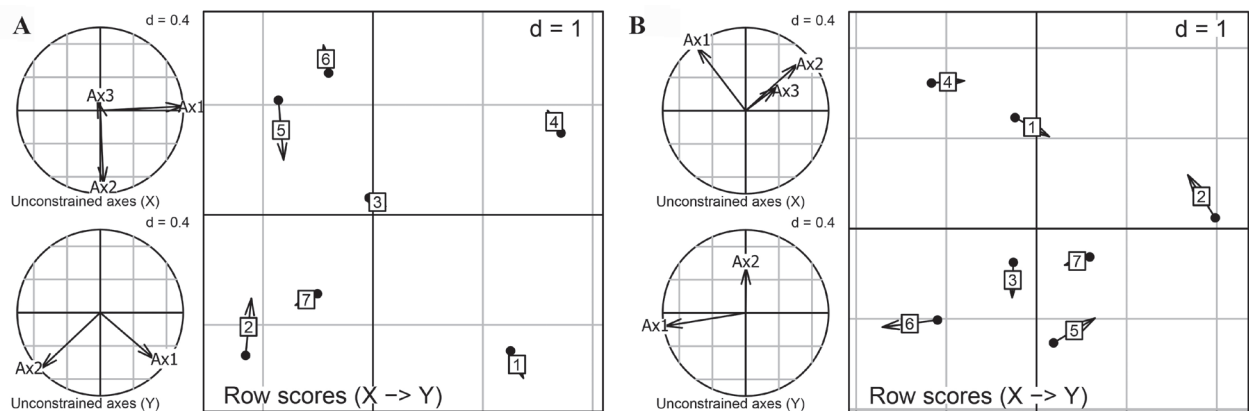


Рис. 5. Зв'язок між структурою досліджених дерев, основаної на синхронності приросту, та структурою на основі реакції приросту на клімат. А: для опадів; В: для температури. Ліворуч на кожному малюнку наведено кореляційні кола, що відображають проєкцію осей аналізу головних компонент для приросту (X вгорі) та для реакції приросту (Y внизу) на графік коінерції (праворуч). Позиції дерев у структурі на основі приросту показано точками, в структурі на основі реакції на клімат – закінченнями стрілок

Fig. 5. Result of the co-inertia analysis for the structure of sampled trees based on radial growth variation (X) and the pattern of trees' reaction on climate (Y). A: co-inertia considering correlations with precipitation; B: with temperature. The correlation circles on the plots left sides show the projection of the growth's PCA axes (upper) and trees' responses between class analysis axes (lower) onto the co-inertia axes. On the right of the plots, the co-inertia scatterplots represent a superposition of two structures. The points denote the position of trees based on the radial growth pattern and the end of the arrows denote the position based on growth-to-climate correlation pattern

кількох дендрокліматичних дослідженнях, результати яких свідчать про те, що характер зв'язку приросту липи з кліматом дуже схожий у різних місцях зростання від півдня Великої Британії до центральної України. Для дерев *T. × europaea* та *T. platyphyllos* із паркового комплексу Хемптон-Корта в Лондоні найбільш важливими виявилися опади в травні–липні в сезон росту деревини та в листопаді попереднього року, при цьому вплив коливань температури був незначущим (Moir, Leroу, 2013). Приріст *T. tomentosa* у міських насадженнях Парижа позитивно корелював із опадами жовтня попереднього сезону та травня поточного й негативно – із температурою повітря в травні (David et al., 2018). *Tilia cordata* в міських насадженнях Мюнхена виявилася чутливою до посушливих умов (Moser et al., 2017), проте велика кількість опадів у березні мала неочікуваний негативний вплив на приріст (Moser-Reischl et al., 2019). Теплі умови в лютому–березні та рясні опади в червні позитивно вплинули на приріст *Tilia* spp. міських насаджень Гельсінкі (Helama et al., 2020). На півдні Польщі в лісових біотопах радіальний приріст *T. cordata* також обмежувався через нестачу опадів у травні–вересні (Barniak et al., 2014). Застосування широкого діапазону інтервалів агрегації даних дозволило нам встановити значущий вплив суми опадів у проміжку з грудня до травня на приріст *T. cordata*, що в цілому узгоджується з характером зв'язку клімат–приріст для цього та близьких видів у інших частинах ареалу.

Важливість гідрологічного чинника для *T. cordata* в період вегетації пов'язана з особливостями фізіології анізогідричних видів, у т. ч. липи (Moser et al., 2017), за умов підвищеної температури повітря. У відповідь на дію посухи та високої температури в анізогідричних видів відбувається мінімальне закриття продихів, через що утримується відносно високий рівень транспірації, але знижується водний потенціал листків (Klein, 2014). Такий механізм охолодження листків і продовження асиміляції карбону є ефективним за достатньої вологості ґрунту, але призводить до розриву водяного стовпчика в судинах рослин, якщо волога стає недоступною. Однак й види з іншою стратегією – ізогідричні у дослідженому нами місці можуть також потерпати від нестачі зволоження під час вегетації. Так, приріст *Quercus robur* у парку "Феофанія" обмежується опадами в травні та грудні (Netsvetov et al., 2019). Значення опадів у травні для *Q. robur* може бути пов'язано із початком формування деревини у цьому місяці, а також підвищенням температури

повітря. Подальше підвищення температури в сезоні може компенсуватися збільшенням опадів. Так, за відсутності суворої посухи найбільше опадів у Києві випадає в липні–червні. Позитивне значення опадів у грудні для обох видів може бути пов'язано з ефектом термоізоляції кореневої системи снігом під час морозів, а кореляція приросту *T. cordata* з опадами до початку сезону – із накопиченням ґрунтом вологи, що використовується рослинами під час формування річного кільця, хоча і перезволоження у цей період може негативно впливати на приріст липи (див. приклад у насадженнях Мюнхена (Moser-Reischl et al., 2019)). Негативні кореляції приросту із сумою опадів було відзначено в нашому дослідженні для індивідуальних хронологічних серій кількох дерев і переважно для коротких інтервалів у період між сезонами приросту.

Відмінності індивідуальних хронологічних серій досліджених дерев *T. cordata* відображають локальні умови зростання, що зумовлені яружно-балковим рельєфом парку "Феофанія" та чергуванням відкритих ділянок із лісовими, де цей вид знаходиться в другому ярусі під покривом крон *Q. robur*. Тим не менш, структура групи дерев утворена на основі приросту, корелює зі структурою, утвореною за характером зв'язку приросту із опадами. Варіація мікроумов зростання в цілому не впливає на чутливість дерев до гідрологічного чинника, а лише модифікує її прояв у сезоні. Індивідуальні серії, на відміну від усередненої, виявили більшу чутливість до проявів кліматичних чинників у короткі, до місяця, інтервали. Це узгоджується із даними про швидку реакцію дерев на нетривалі природні явища (González, Eckstein, 2003). Для більш детальної інтерпретації результатів дендрокліматичних досліджень необхідно враховувати фенологію ксилогенезу. В попередньому дослідженні встановлено, що у *Q. robur* у Києві в квітні активується камбій і починається формування судин ранньої деревини, перехід до формування пізньої деревини відбувається в червні, а закінчення радіального приросту – у вересні (Lahoiko et al., 2019). Хоча для жодного з видів роду *Tilia* такі дані в літературі відсутні, відомо, що після закінчення приросту пагонів у довжину приблизно у фазі цвітіння інтенсифікується ріст коренів, який сягає свого максимуму після дозрівання плодів (Murakhtanov, 1981). Таким чином, відзначений позитивний вплив опадів наприкінці попереднього сезону у видів *Tilia* в Лондоні (Moir, Leroу, 2013) та Парижі (David et al., 2018), може бути пов'язаний зі стимуляцією росту коренів.

Висновки

Незважаючи на складнощі датування річних кілець, хронологічні серії радіального приросту *T. cordata* містять потужний кліматичний сигнал, що робить цей вид перспективним у дендрокліматичних дослідженнях. Приріст *T. cordata* обмежується опадами, що випадають в період з грудня до травня. В лісових біотопах Києва *T. cordata* є відомодовгожителем, її вік може перевищувати 300 років при значенні середнього приросту 0,95 мм за рік.

Список посилань

- Aloshkina U.M. 2011. *Ukrainian Botanical Journal*, 68(1): 76–90. [Альошкіна У.М. 2011. Поширення та характеристика рідкісних біотопів м. Києва. *Український ботанічний журнал*, 68(1): 76–90].
- Barniak J., Wilczyński S., Krąpiec M. 2014. Dendrochronology of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) in southern Poland. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 16(40): 75–80.
- Bernabei M., Pollini C. 2006. Nota dendrocronologica sui tigli di S. Lugano (Bolzano, Italia). *L'Italia Forestale E Montana*, 2: 131–145. <https://doi.org/10.4129/IFM.2006.2.03>
- Buras A. 2017. A comment on the expressed population signal. *Dendrochronologia*, 44: 130–132. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.005>
- Cook E.R., Kairiukstis L. 1990. *Methods of Dendrochronology – Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 403 pp.
- David A.A.J., Boura A., Lata J., Rankovic A., Kraepiel Y., Charlot C., Barot S., Abbadie L., Ngao J. 2018. Street trees in Paris are sensitive to spring and autumn precipitation and recent climate changes. *Urban Ecosystems*, 21: 133–145. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0704-z>
- Didukh Ya.P. 2012. *Fundamentals of bioindication*. Ed. D.M. Hrodzynski. Kyiv: Naukova Dumka, 344 pp. [Дідух Я.П. 2012. *Основи біоіндикації*. Відп. ред. Д.М. Гродзинський. Київ: Наукова думка, 344 с.].
- Dray S., Chessel D., Thioulouse J. 2003. Co-inertia analysis and the linking of the ecological data tables. *Ecology*, 84(11): 3078–3089. <https://doi.org/10.1890/03-0178>
- Dubyna D.V., Dzyuba T.P., Iemelyanova S.O., Bagrikova N.O., Borysova O.V., Borsukevych L.M., Vynokurov D.S., Gapon S.V., Gapon Yu.V., Davydov D.A., Dvoretzky T.V., Didukh Ya.P., Zhmud O.I., Kozyr M.S., Konishchuk V.V., Kuzemko A.A., Pashkevych N.A., Ryff L.E., Solomakha V.A., Felbaba-Klushyna L.M., Fitsailo T.V., Chorna G.A., Chorney I.I., Shelyag-Sosonko Yu.R., Iakushenko D.M. 2019. *Prodrome of the vegetation of Ukraine*. Kyiv: Naukova Dumka, 784 pp. [Дубина Д.В., Дзюба Т.П., Ємельянова С.О., Багрикова Н.О., Борисова О.В., Борсукевич Л.М., Винокуров Д.С., Гапон С.В., Гапон Ю.В., Давидов Д.А., Дворецький Т.В., Дідух Я.П., Жмуд О.І., Козир М.С., Конішчук В.В., Куземко А.А., Пашкевич Н.А., Рифф Л.Е., Соломаха В.А., Фельбаба-Клушина Л.М., Фіцайло Т.В., Чорна Г.А., Чорней І.І., Шеляг-Сосонко Ю.Р., Якушенко Д.М. 2019. *Продромус рослинності України*. Київ: Наукова думка, 784 с.].
- Ellison A.M., Bank M.S., Clinton B.D., Colburn E.A., Elliott K., Ford C.R., Foster D.R., Kloeppel B.D., Knoepp J.D., Lovett G.M., Mohan J., Orwig D.A., Rodenhouse N.L., Sobczak W.V., Stinson K.A., Stone J.K., Swan C.M., Thompson J., Von Holle B., Webster J.R., 2005. Loss of foundation species: consequences for the structure and dynamics of forested ecosystems. *Frontiers in Ecology and Environment*, 3: 479–486. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0479:LOFSCF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0479:LOFSCF]2.0.CO;2)
- González I.G., Eckstein D. 2003. Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiology*, 23(7): 497–504. <https://doi.org/10.1093/treephys/23.7.497>
- Helama S., Läänelaid A., Raisio J., Sohar K., Mäkelä A. 2020. Growth patterns of roadside *Tilia* spp. affected by climate and street maintenance in Helsinki. *Urban Forestry and Urban Greening* (in press). <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126707>
- Heo M., Gabriel K.R. 1997. A permutation test of association between configurations by means of the RV coefficient. *Communications in Statistics – Simulation and Computation*, 27: 843–856.
- Holmes R.L. 1983. Computer assisted quality control in tree ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43: 69–78.
- Jevšenak J., Levanič T. 2018. *dendroTools*: R package for studying linear and nonlinear responses between tree-rings and daily environmental data. *Dendrochronologia*, 48: 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2018.01.005>
- Klein T. 2014. The variability of stomatal sensitivity to leaf water potential across tree species indicates a continuum between isohydric and anisohydric behaviours. *Functional Ecology*, 28:1313–1320. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12289>
- Klymenko Yu.O., Moroz V.V., Druzhyna M.M., Kondratyev V.V. 2015. *Scientific reports of NUNES of Ukraine*, 5(54). [Клименко Ю.О., Мороз В.В., Дружина М.М., Кондратьев В.В. 2015. Оцінка стану популяції основних паркоутворюючих видів у виділах вікової *Querceta roboris* парку "Феофанія". *Наукові доповіді НУБіП України*, 5(54). Available at: http://nd.nubip.edu.ua/2015_4/27.pdf (Accessed 22 March 2020).
- Läänelaid A., Sander H. 2004. History and age of old limes (*Tilia* spp.) in Tallinn, Estonia. In: *Forestry Serving Urbanised Societies*. Eds C.C. Konijnendijk, J. Schipperijn, K.K. Hoyer. Vienna: IUFRO World Series, pp. 267–280.
- Lahoiko A., Prokopuk Yu., Netsvetov M. 2019. Wood formation in two *Quercus robur* phenological forms in Kyiv, Ukraine. In: *Tree-ring in Archeology, Climatology*

- and Ecology 2019. Eds G. Battipaglia, R. Marzaioli. San Leucio-Caserta, pp. 147.
- Loveliu N.V., Gritsan Yu.I. 1998. *Lesnye ekosistemy Ukrainy i teplovлагообеспеченность*. Sanct-Petersburg: Neva, 227 pp. [Ловеллус Н.В., Грицан Ю.И. 1998. *Лесные экосистемы Украины и тепловолагообеспеченность*. Санкт-Петербург: Нева, 227 с.].
- Lykholat Yu., Alekseeva A., Khromykh N., Ivan'ko I., Kharytonov M., Kovalenko I. 2016. Assessment and prediction of viability and metabolic activity of *Tilia platyphyllos* in arid steppe climate of Ukraine. *Agriculture & Forestry*, 62(3): 55–64. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.62.3.05>
- Masalskyi V.P. 2010. *Plant Introduction*, 2: 25–27. [Масальський В.П. 2010. Сезонний ритм розвитку видів роду *Tilia* L. в умовах Правобережного Лісостепу України (на прикладі м. Біла Церква). *Інтродукція рослин*, 2: 25–27].
- Masalskyi V.P., Mordatenko I.L. 2014. *Scientific Bulletin of UNFU*, 24(4): 104–108. [Масальський В.П., Мордатенко І.Л. 2014. Газо- і димостійкість культивованих видів роду *Tilia* L. в умовах урбанізованого середовища Правобережного Лісостепу України (на прикладі вуличних насаджень міст Києва та Білої Церкви). *Науковий вісник ЛНТУ України*, 24(4): 104–108].
- Moir A.K., Leroy S.A.G. 2013. Dendrochronological potential of lime (*Tilia* spp.) from trees at Hampton Court Palace, UK. *Arboricultural Journal*, 35(1): 7–17, <https://doi.org/10.1080/03071375.2013.783173>
- Moser A., Rahman M.A., Pretzsch H., Pauleit S., Rötzer T. 2017. Inter- and intraannual growth patterns of urban small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) at two public squares with contrasting microclimatic conditions. *International Journal of Biometeorology*, 61: 1095–1107. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1290-0>
- Moser-Reischl A., Rahman M.A., Pauleit S., Pretzsch H., Rötzer T. 2019. Growth patterns and effects of urban micro-climate on two physiologically contrasting urban tree species. *Landscape and urban planning*, 183: 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.11.004>
- Murakhtanov E.S. 1981. *Lira*. Moscow: Lesnaja promyshlennost, 80 pp. [Мурахтанов Е.С. 1981. *Ліра*. Москва: Лесная промышленность, 80 с.].
- Nebesnyi V.B., Hrodzynska H.A., Honchar H.Yu. 2016. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 8: 59–66. [Небесний В.Б., Гродзинська Г.А., Гончар Г.Ю. 2016. Використання спектрометричного методу для оцінки для оцінки стану урбанізованих територій міста Києва. *Вісник НАН України*, 8: 59–66].
- Netsvetov M., Prokopuk Y., Didukh Y., Romenskyu M. 2018. Climatic sensitivity of *Quercus robur* L. in floodplain near Kyiv under river regulation. *Dendrobiology*, 79: 20–33. <http://dx.doi.org/10.12657/denbio.079.003>
- Netsvetov M., Prokopuk Y., Puchalka R., Koprowski M., Klisz M., Romenskyu M. 2019. River regulation causes rapid changes in relationships between floodplain oak growth and environmental variables. *Frontiers in Plant Science*, 10: 96. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00096>
- Padun I.M. 1985. *Ukrainian Botanical Journal*, 42(2): 17–20. [Падун І.М. 1985. Сучасний стан рослинності урочища Феофанія. *Український ботанічний журнал*, 42(2): 17–20].
- Pigott D. 1992. The clones of common lime (*Tilia* × *vulgaris* Hayne) planted in England during the seventeenth and eighteenth centuries. *New Phytologist*, 121: 487–493. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb02949.x>
- Radoglou K., Dobrowolska D., Spyroglou G., Nicolescu V.-N. 2008. A review on the ecology and silviculture of limes (*Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tomentosa* Moench.) in Europe. *Bodenkultur*, 3(3): 9–20.
- R Core Team. 2020. *A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Available at: <http://www.R-project.org/> (Accessed 20 March 2020).
- Rozas V. 2003. Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*: testing previous and improved methods. *Plant Ecology*, 167(2): 193–212. <https://doi.org/10.1023/A:1023969822044>
- Smirnova O.V., Chistyakova A.A. 1980. *Journal of General Biology*, 41(3): 350–362. [Смирнова О.В., Чистякова А.А. 1980. Анализ фитоценологических потенций некоторых древесных видов широколиственных лесов Европейской части СССР. *Журнал общей биологии*, 41(3): 350–362].
- Solomakha V.A. 2008. *Syntaxonomical of vegetation of Ukraine*. Kyiv: Phytosociocentre, 296 pp. [Соломаха В.А. 2008. *Синтаксономія рослинності України*. Київ: Фітосоціоцентр, 296 с.].
- Sovakov O.V., Sovakova M.O., Ostapchuk O.S. 2017. *Forestry and landscape gardening*, 11. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc_2017_11_13 (Accessed 12 March 2020). [Соваков О.В., Совакова М.О., Остапчук О.С. 2017. Видове різноманіття роду *Tilia* у колекційних фондах Києва. *Лісове і садово-паркове господарство*, 11. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/licgoc_2017_11_13 (Дата звернення 12 березня 2020)].
- Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D. 1984. On the average value of correlated times series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and applied Meteorology*, 23: 201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2)

Рекомендує до друку Я.П. Дідух