

УДК 630. 561.24

<https://doi.org/10.33220/1026-3365.141.2022.102>

І. М. КОВАЛЬ, В. П. ВОРОН, Є. Є. МЕЛЬНИК, С. Г. СИДОРЕНКО
ОЦІНЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИХ СЕЗОНІВ
У ЛІВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ ДЕНДРОХРОНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

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

Досліджено радіальний приріст *Pinus sylvestris* L. у Лівобережному Лісостепу. Використано метод накладання епох, сутність якого полягає в тому, що динаміку приросту й кліматичних чинників розглядають у межах 11-річного циклу сонячної активності (циклу Швабе – Вольфа). Створено регіональну хронологію для Лісостепу, яка складається із 62 індивідуальних деревно-кільцевих серій. Зіставлено динаміку деревно-кільцевої індексної хронології RESIDUAL та динаміку чисел Вольфа. Виявлено цикли сонячної активності (СА) за числами Вольфа тривалістю 9–13 років: 1823–1834, 1834–1843, 1843–1856, 1878–1889, 1889–1901, 1901–1912, 1912–1924, 1924–1934, 1934–1944, 1944–1954, 1954–1964, 1964–1976, 1976–1986, 1986–1997, 1997–2008, 2008–2019 та 2019–2030 рр. На гілці підйому СА зафіксовано збільшення кількості опадів та амплітуди коливань показників зволоження й температури. Отже, у вологі періоди доцільно створювати лісові культури, а перехідні до сухих років періоди використовувати для проведення рубок догляду. Виявлено зв'язок між рівнем вологозабезпечення (гідротермічний коефіцієнт), динамікою приросту дерев і пожежонебезпечними сезонами. Дендрохронологічними методами виявлено роки з мінімальною вологістю, тобто пожежонебезпечні, – 2020, 2024 та 2028 рр., а також роки з максимальною вологістю – 2021, 2023 та 2025 рр.
Ключові слова: радіальний приріст *Pinus sylvestris* L., 11-річний цикл сонячної активності, числа Вольфа, прогноз, пожежонебезпечні періоди.

Вступ. Прогнозування приросту деревостанів є важливим і актуальним завданням лісової галузі для визначення оптимальних стратегій й тактики господарської діяльності. Наявність циклічної мінливості сонячної активності (СА), що відбивається в динаміці кліматичних ритмів та інших природних процесів, необхідно брати до уваги під час аналізу кліматичних чинників, моделювання їхньої динаміки й прогнозування мінливості приросту дерев (Nordemann et al. 2005, Prestes et al. 2011). Дендрохронологічну інформацію широко використовують в екологічному прогнозуванні. Прогнози, що базуються на даних визначення радіального приросту, виділяють в особливий клас екологічних прогнозів – дендрохронологічних. У лісовому господарстві такі прогнози є необхідними для планування охорони лісів від пожеж і захисту від шкідників і хвороб, лісовідновних робіт, рубок догляду за лісом та інших видів діяльності. Найпростішим і найнадійнішим способом вивчення зв'язків річного приросту сосни з кліматичними чинниками є пряме зіставлення цих показників за досліджуваній часовий ряд (Matveev 2014, Koval 2021).

Мета роботи – прогнозування пожежонебезпечних років дендрохронологічними методами з використанням динаміки сонячної активності для Лівобережного Лісостепу.

Матеріали й методи. Керни відібрано в 100-річному чистому сосновому насадженні, яке росте на території Державного підприємства «Харківська лісова науково-дослідна станція» (квартал 159, вид. 2). Основні таксаційні показники насадження: $H_{\text{сер.}} = 24$ м, $D_{\text{сер.}} = 42$ см, клас бонітету II, тип лісу В₂-дС (свіжий дубово-сосновий субір), повнота – 0,6, запас деревини на 1 га – 310 м³. В аналізі використано дані Харківської метеостанції та дані з журналу обліку лісових пожеж ДП «Харківська лісова науково-дослідна станція».

Використано стандартні дендрохронологічні методики (Cook and Kairiukstis 1990). Після відбору кернів здійснювали вимірювання та датування приросту, тобто визначення для кожного кільця фактичного року формування. Надалі методом стандартизації, тобто створенням деревно-кільцевих індексних хронологій за допомогою програми ARSTAN, вилучено вікові тренди з індивідуальних деревно-кільцевих серій. Це дало змогу знайти реакцію радіального приросту на вплив зовнішніх умов. Ця процедура є фільтрацією низькочастотної складової в багаторічних коливаннях приросту.

Застосовано метод накладання епох, який належить до непараметричних методів виділення прихованої періодичності. Сутність методу полягає в тому, що динаміку приросту й кліматичних чинників аналізують у межах 11-річного циклу СА (циклу Швабе – Вольфа).

Перевагою цього методу є відсутність апріорного припущення про форму періодичної складової, яка в більшості випадків вважається гармонікою, а отже, є змога визначити істинну форму періодичної складової (Matveev 2014).

Із застосуванням методу накладених епох зроблено візуальний аналіз рядів. Досліджено графіки ширини річних кілець залежно від віку в абсолютних одиницях (мм) й у відносних індексах (%). Цей метод дає змогу оцінити загальний характер динаміки приросту, виявити дати екстремумів, простежити зміни амплітуди й частоти коливань, виявити циклічність коливань приросту. Виконано також спектральний аналіз із використанням методу накладених епох.

За нульовий (реперний) рік беруть рік максимуму СА в 11-річному циклі. За досліджуваний період (кілька 11-річних циклів, залежно від довжини ряду) розраховують середні значення показників для нульового року, попередніх і наступних років як для СА (у числах Вольфа), так і для інших характеристик, які досліджують: опадів, температури, гідротермічного коефіцієнта Г. Т. Селянінова (ГТК), індексів приросту. Отримані дані можуть бути подані у вигляді таблиць і графічно. Цей метод дає можливість оцінити динаміку та екстремуми приросту й кліматичних факторів щодо фази циклу СА (Matveev 2014). Для прогнозу динаміки радіального приросту сосни звичайної використано множинно-регресійну модель чисел Вольфа та дані метеостанції Харків (Kholoptsev & Nikiforova 2011). Лівобережний Лісостеп відзначається посушливим кліматом із нерівномірним зволоженням як протягом року, так і за окремими роками. Нами використано кореляційний аналіз зв'язків індексів радіального приросту сосни звичайної та динаміки лісових пожеж із кліматичними показниками, зокрема опадами, середньою температурою повітря і ГТК (Oliynyuk & Viter 2011) за вегетаційний період (квітень – серпень), СА (у числах Вольфа – W) за 2017–2020 рр. (World Data Center 2021).

Результати та обговорення. На основі 20 індивідуальних деревно-кільцевих хронологій створено індексну деревно-кільцеву хронологію RESIDUAL, з якої видалено віковий тренд. Зіставлено динаміку індексів радіального приросту сосни звичайної в насадженні Лівобережного Лісостепу та СА (рис. 1, табл. 1).

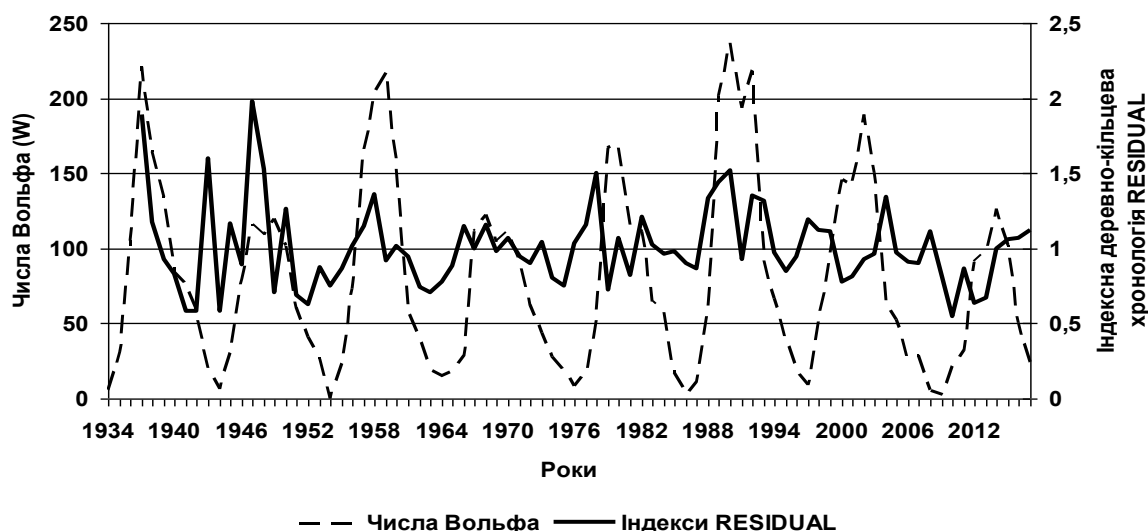


Рис. 1 – Динаміка індексів радіального приросту сосни звичайної RESIDUAL для насадження ДП «Харківська лісова науково-дослідна станція» та сонячної активності (World Data Center 2021)

Кореляційним аналізом виявлено статистично значущі середні додатні зв'язки між індексною деревно-кільцевою хронологією RESIDUAL і числами Вольфа ($r = 0,35$; $t_{\text{факт.}} = 3,27$; $t_{0,01} = 2,68$).

11-річні цикли сонячної активності (числа Вольфа) (World Data Center 2021)

№ циклу	Початок циклу, рік	Кінець циклу, рік	Тривалість циклу, років	Рік максимального значення числа Вольфа (W)
17	1934	1944	10	1937
18	1944	1954	10	1947
19	1954	1964	10	1958
20	1964	1976	12	1968
21	1976	1986	10	1979
22	1986	1997	11	1990
23	1997	2008	11	2002
24	2008	2019	11	2014
25*	2019	2030	11	2024

*25 цикл – прогноз.

Виявлено роки депресії приросту, викликані дефіцитом вологості: 1962, 1975, 1995, 2000, 2010 та 2012 рр., для яких ГТК становив від 0,44 до 0,97, тобто ці роки належать до діапазону від середньо посушливих до років з недостатньою вологістю за ГТК Селянінова (рис. 2).

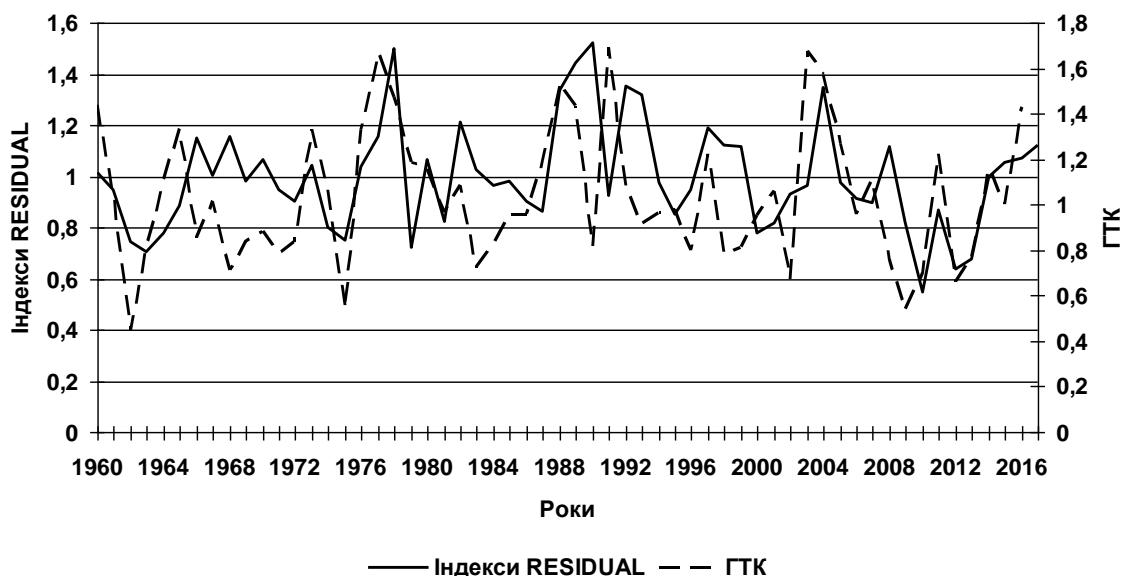


Рис. 2 – Динаміка індексної деревно-кільцевої хронології RESIDUAL та гідротермічного коефіцієнта

Виявлено статистично значущі середні додатні зв'язки між деревно-кільцевою хронологією RESIDUAL та ГТК ($\eta = 0,38$; $t_{\text{факт.}} = 3,07$; $t_{0,01} = 2,63$). Кількість опадів за квітень – серпень у ці роки становила 115–219 мм за норми 260 мм (відхилення від норми – від 16 до 55 %). Подібні результати отримано дендрохронологічними дослідженнями в Центральному Лісостепу. Кореляційний аналіз виявив низьку тісноту прямолінійного зв'язку між індексами річних кілець сосни на обстежених ділянках із показником сонячної активності (у числах Вольфа): коефіцієнт кореляції $r = 0,1$. Нелінійний зв'язок виявився помірним: кореляційне відношення $\eta = 0,4$ (Matveev 2014). Роки з мінімальними індексами приросту річного кільця збігаються з найпосушливішими роками, коли було багато пожеж (1994, 1999, 2002, 2009, 2012, 2015) на досліджуваній ділянці (див. рис. 2, 3). Залежність кількості пожеж від ГТК апроксимовано поліноміальною кривою третього порядку ($r = 0,41$; $t_{\text{факт.}} = 2,59$; $t_{0,05} = 2,05$) (рис. 4). Отже, виявлено залежність між радіальним приростом дерев і СА (числами Вольфа), між радіальним приростом та умовами вологозабезпечення (ГТК), а також знайдено значущі зв'язки між кількістю пожеж і ГТК. Це свідчить про наявність зв'язків між динамікою приросту дерев і роками високої пожежної небезпеки.

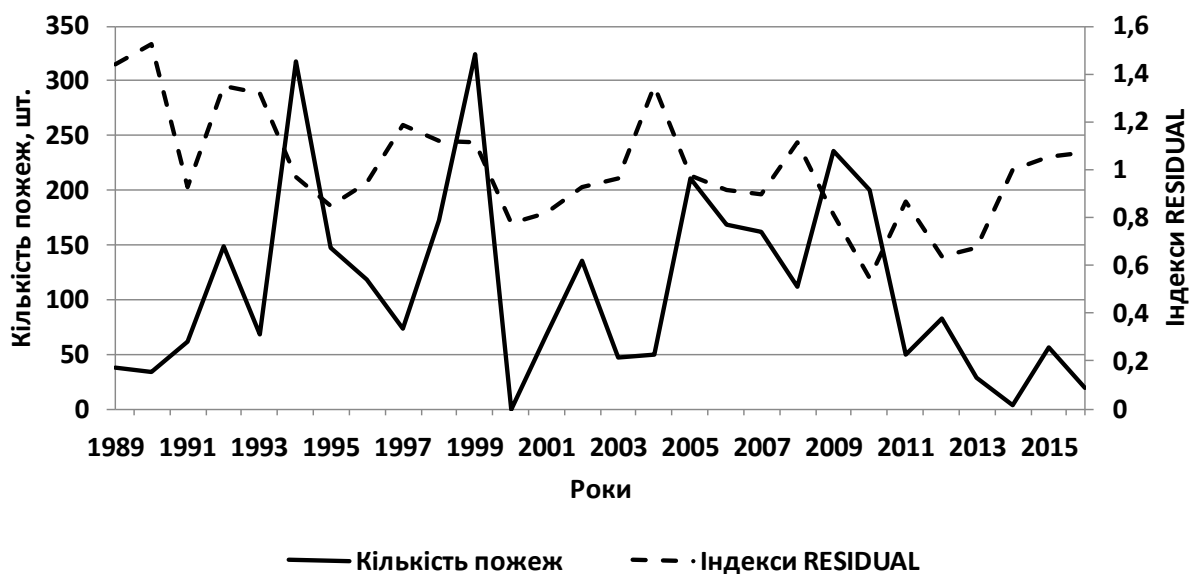


Рис. 3 – Динаміка індексів радіального приросту RESIDUAL та кількості пожеж

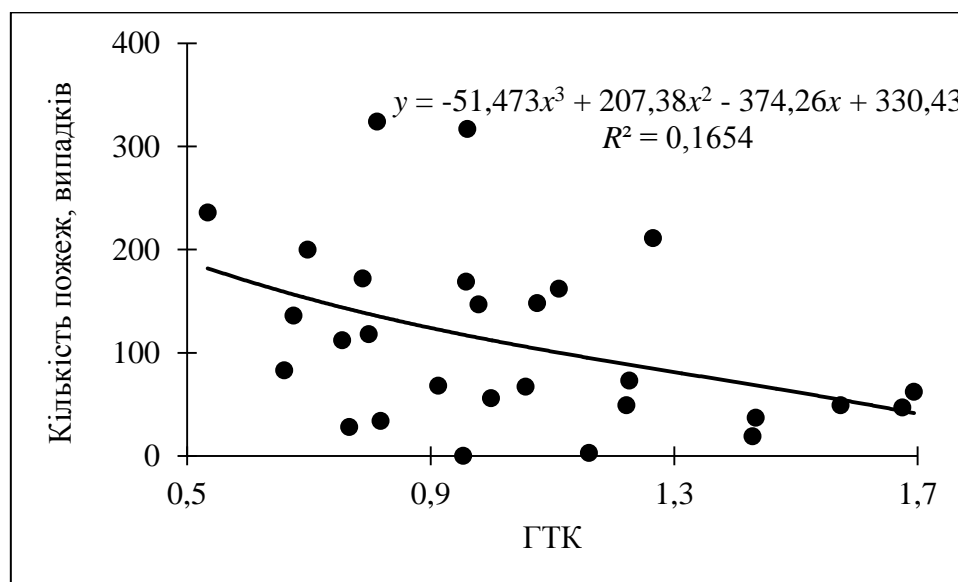


Рис. 4 – Залежність кількості пожеж від гідротермічного коефіцієнта

Найменші числа Вольфа виявлено під час 20 та 24 циклів СА (1964–1976 та 2008–2019 рр. відповідно). Найменший радіальний приріст характерний для 19, 20 та 24 циклів, тобто для 1954–1964, 1964–1976 та 2008–2019 рр. Найвищі температури виявлено для 24 циклу, а найменшу суму опадів – для 20 циклу. При цьому за даними ГТК найбільш посушливим видався 24 цикл (2008–2019 рр.). Упродовж 23 циклу відбулося 127 пожеж, а впродовж 24 – 76 (табл. 2).

Дендрохронологічними дослідженнями *Araucaria angustifolia* в Бразилії також виявлено узгодженість динаміки річного радіального приросту і 11-річного циклу СА в періоди її максимуму (Prestes et al. 2011). Найбільш помітним є 10–12-річний цикл, першопричиною якого, очевидно, є 11-річний цикл СА (Douglass 1919).

У наших дослідженнях тривалість 17–25 циклів СА Швабе – Вольфа становить 10–14 років (рис. 5). Аналіз усереднених значень чисел Вольфа та індексів RESIDUAL за 11-річними циклами методом накладених епох виявив максимуми радіального приросту за рік до максимумів СА, за два роки до максимуму (на гілці росту СА) та через три роки після максимуму (на гілці зменшення СА) (рис. 6).

Середні значення чисел Вольфа, індексів радіального приросту RESIDUAL, кількості пожеж і кліматичних чинників для 11-річних циклів сонячної активності

№ циклу	Рік початку та кінця циклу	Середні числа Вольфа	Середнє значення індексів радіального приросту RESIDUAL	Середні температури за квітень – серпень, °С	Середня сума опадів за квітень – серпень, мм	ГТК* за квітень – серпень, умовні одиниці
17	1934–1944	82,4 ± 20,8	1,0 ± 0,18	–	–	–
18	1944–1954	62,6 ± 13,4	1,0 ± 0,13	–	–	–
19	1954–1964	88,1 ± 24,5	0,93 ± 0,06	–	–	–
20	1964–1976	58,5 ± 12,0	0,96 ± 0,04	17,0 ± 0,45	218,0 ± 19,9	0,97 ± 0,07
21	1976–1976	70,8 ± 18,5	1,03 ± 0,06	16,4 ± 0,35	272,8 ± 17,6	1,12 ± 0,08
22	1986–1997	95,6 ± 26,2	1,13 ± 0,07	16,7 ± 0,24	283,4 ± 21,8	1,13 ± 0,08
23	1997–2008	79,4 ± 18,1	1,01 ± 0,05	17,5 ± 0,22	278,7 ± 21,0	1,07 ± 0,09
24	2008–2019	55,4 ± 14,3	0,89 ± 0,07	18,1 ± 0,40	256,7 ± 27,3	0,93 ± 0,11
25**	2019–2030	72,2 ± 16,3	0,98 ± 0,04	17,0 ± 0,22	242,3 ± 18,0	1,04 ± 0,04

*ГТК – гідротермічний коефіцієнт Селянінова. **Прогноз.

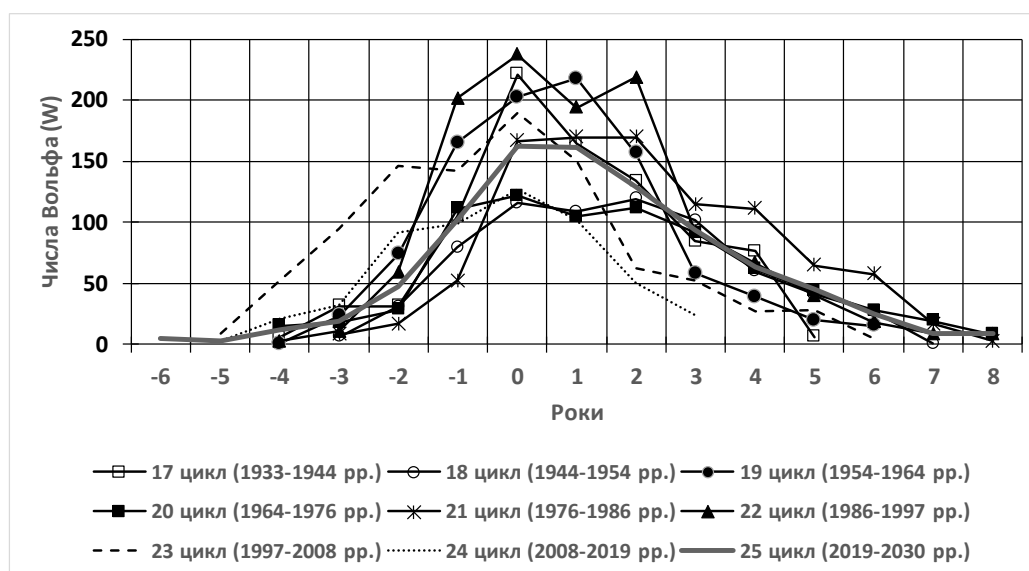


Рис. 5 – Динаміка сонячної активності, наведена за методом накладених епох (25 цикл – прогнозовані числа Вольфа)

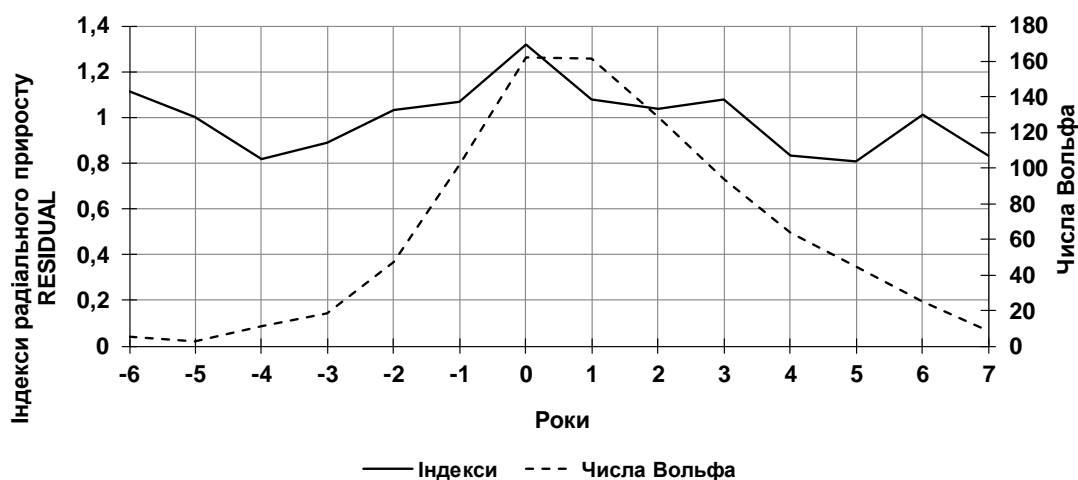


Рис. 6 – Усереднені числа Вольфа та індекси радіального приросту RESIDUAL за циклами Швабе – Вольфа

Мінімум кількості опадів припадає на рік максимальної активності сонця, на четвертий рік після підйому СА та на четвертий рік після її спаду. Максимальна кількість опадів припадає на другий рік до максимуму чисел Вольфа та на перший рік після нього, тобто на гілці спаду СА (рис. 7).

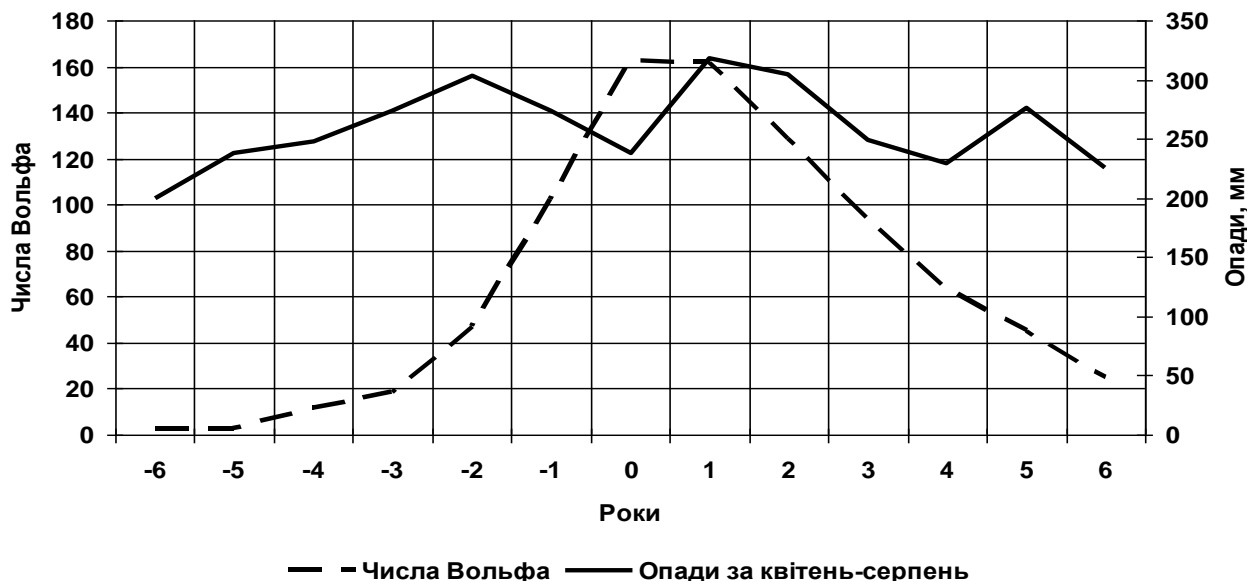


Рис. 7 – Усереднені числа Вольфа та опади за квітень – серпень

Максимальні значення чисел Вольфа супроводжують зниження температур, і навпаки (рис. 8).

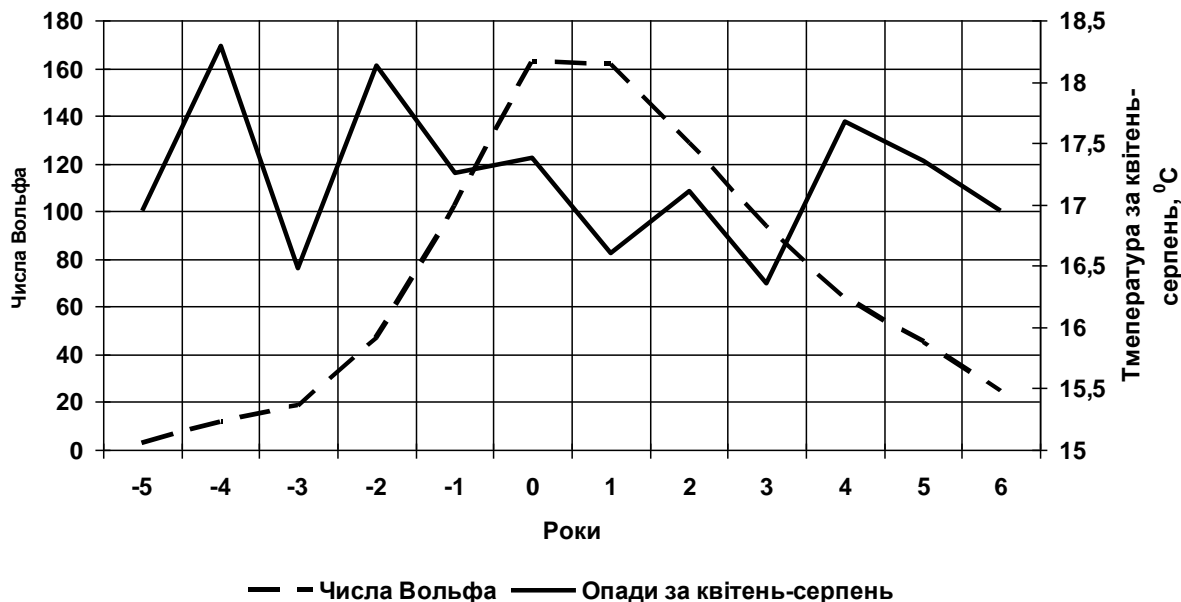


Рис. 8 – Усереднені числа Вольфа та температури за квітень – серпень

У зв'язку з тим, що ГТК Селянінова має найтісніші кореляційні зв'язки з приростом і СА, його використано для аналізу накладених епох.

Мінімуми радіального приросту та ГТК визначали за один і чотири роки до максимуму та через один та 4–5 років після максимуму чисел Вольфа на гілці спаду СА (рис. 9).

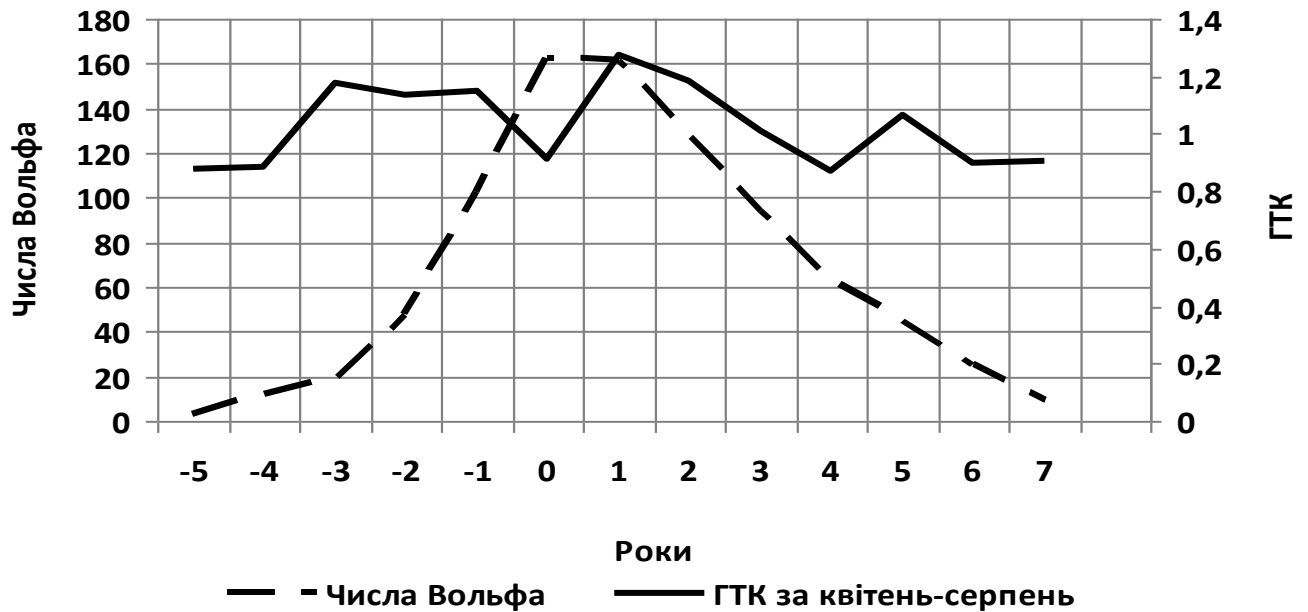


Рис. 9 – Усереднені числа Вольфа та гідротермічні коефіцієнти за циклами Швабе – Вольфа

Перший максимум індексів радіального приросту на тлі середнього циклу СА визначено за один або за два роки до максимуму чисел Вольфа. У рік піку СА відбувається зменшення кількості опадів і приросту, а температура упродовж вегетаційного періоду збільшується. Максимуми приросту на гілці спаду СА припадають на другий або третій роки, а мінімуми – на четвертий або п'ятий роки, тобто на роки підвищення вологості та зменшення температури вегетаційного періоду.

Подібні результати отримано в Центральному Лісостепу: поєднання різних чинників, що діють у комплексі на формування приросту сосни, не завжди призводить до зменшення радіального приросту дерев пропорційно силі посухи. Це порушує циклічні коливання радіального приросту сосни й посушливих років. Крім того, залежно від розподілу опадів за місяцями, температурного режиму та внутрішніх чинників мінімальний приріст може посунути на 1–2 роки (Matveev 2014).

Виходячи з того, що 25 цикл Швабе – Вольфа триватиме з 2019 до 2030 р. з максимумом СА у 2025–2026 рр. (нульовий рік), визначено роки з мінімальною вологістю, тобто пожежонебезпечні 2020, 2024 та 2028, а також роки з максимальною вологістю – 2021, 2023 та 2025. Найвищі температури виявлено на гілці збільшення СА за чотири роки до максимуму чисел Вольфа та на четвертий рік після максимуму чисел Вольфа на гілці спаду СА, а також у рік максимуму СА. Найнижчі температури виявлено на гілці зростання СА за один і три роки до максимуму чисел Вольфа та на гілці спаду СА через один і три роки після максимуму чисел Вольфа. У вологі періоди доцільно створювати лісові культури, а в перехідні до сухих років періоди – здійснювати рубки догляду.

Висновки. Виявлено тісний зв'язок між гідротермічним показником Г. Т. Селянинова та числами Вольфа, з одного боку, та індексами радіального приросту – з іншого. Дендрохронологічними методами виявлено роки з мінімальною вологістю, тобто пожежонебезпечні (2020, 2024 та 2028 рр.), та роки з максимальною вологістю (2021, 2023 та 2025 рр.). У період зниження сонячної активності збільшується температура, зменшується кількість опадів і ГТК, що створює умови для виникнення й поширення пожеж.

ПОСИЛАННЯ – REFERENCES

Cook, E. R. and Kairiukstis, L. A. 1990. Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences. International Institute for Applied Systems Analysis. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 394 p.

Douglass, A. E. 1919. Climatic cycles and tree-growth : A study of the annual rings of trees in relation to climate and solar activity. Washington, Carnegie Institution of Washington, 127 p. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.121855>

Kholoptsev, A. V. and Nikiforova, M. P. 2011. Methodology of ultra-long-term forecasting of changes in the state of solar activity using a multiple linear regression model. Herald of V.N. Karazin KhNU. Ecology, 944 (6): 13–20 (in Russian).

Koval, I. 2021. Climatic signal in the regional tree-ring chronology of *Pinus sylvestris* L. in the Left-Bank Forest-Steppe. Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, 22: 188–198 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/412117>

Matveev, S. M. 2014. Cyclicity in the dynamics of the radial growth of natural and artificial pine stands in the forests of the Central forest-steppe. Forest Bulletin, 5 (105): 110–116 (in Russian).

Nordemann, D. J. R., Rigozo, N. R., Faria, H. H. 2005. Solar activity and El-Niño signal sobserved in Brazil and Chile tree ring records. Advances in Space Research, 35: 891–896.

Oliylyk, V. S. and Viter, R. M. 2011. Forestry: a course of lectures. Ivano-Frankivsk, Symphony, 264 p. (in Ukrainian).

Prestes, A., Rigozo, N. R., Nordemann, D. J. R., Wrasse, C. M., Souza Echer, M. P., Echer, E., Rosa, M. B., Rampelotto, P. H. 2011. Sun-earth relationship inferred by tree growth rings in conifers from Severiano De Almeida, Southern Brazi. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 73(11–12): 1587–1593. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.12.014>

World Data Center for the production, preservation and dissemination of the international sunspot number. 2021. [Electronic resource]. Sunspot Index and Long-term Solar Observations. Available at: <http://sidc.be/silso/home> (accessed 10.08.2022).

Koval I. M., Voron V. P., Melnyk Ye. Ye., Sydorenko S. H.

ASSESSMENT AND PREDICTION OF FIRE-DANGEROUS SEASONS IN THE LEFT-BANK FOREST-STEPPE BY MEANS OF DENDROCHRONOLOGICAL METHODS

Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky

The paper outlines the study of the radial growth of *Pinus sylvestris* L. in the Forest-Steppe. The aim of the work was to forecast the radial growth of pine based on the dynamics of solar activity. We used the method of overlapping epochs. Its essence is that the analysis of the dynamics of growth and fluctuations of climatic factors is carried out within the 11-year cycle of solar activity, which is also called the Schwabe – Wolf cycle. A regional pine chronology was created for Forest-Steppe, consisting of 62 individual tree-ring series. The dynamics of the RESIDUAL tree-ring index chronology and the dynamics of Wolf numbers were compared. The following cycles of solar activity were determined according to Wolf numbers with a duration of 9–13 years: 1823–1834, 1834–1843, 1843–1856, 1878–1889, 1889–1901, 1901–1912, 1912–1924, 1924–1934, 1934–1944, 1944–1954, 1954–1964, 1964–1976, 1976–1986, 1986–1997, 1997–2008, 2008–2019 and 2019–2030. On the branch of rising solar activity, there is an increase in the amount of precipitation and the amplitude of fluctuations in both humidity and temperature. Therefore, wet periods should be used for more mass creation of forest stands, while transitional periods to dry years, for preventive maintenance felling.

Key words: radial growth of *Pinus sylvestris* L., 11-year cycle of solar activity, Wolf numbers, prediction, fire-hazardous periods.

E-mail: koval_iryana@ukr.net

Одержано редколегією 31.10.2022