

## ВПЛИВ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ НА САНІТАРНИЙ СТАН ЛІСІВ

**В. В. Мороз**

кандидат сільськогосподарських наук, доцент

Західноукраїнський національний університет (м. Тернопіль, Україна)

e-mail: vera\_moroz@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1457-4641>**Г. Т. Криницький**

доктор біологічних наук, професор

Національний лісотехнічний університет України (м. Львів, Україна)

e-mail: krynytsk@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-9991>

У статті представлено результати комплексного дослідження впливу сонячної активності, вираженої числом Вольфа, на санітарний стан лісових екосистем України в контексті змін клімату та глобальних екологічних трансформацій. Основною метою роботи є визначення характеру прямого та відтермінованого зв'язку між індексом сонячної активності та різними категоріями загибелі лісів з урахуванням супутніх кліматичних, біотичних та антропогенних чинників. Наукова новизна дослідження полягає в застосуванні лагового аналізу (із часовою затримкою до трьох років), що дає змогу оцінити інерційні реакції лісових біоценозів на зміну космічних чинників. Методологічну основу дослідження становить статистичний аналіз багаторічних даних (1961–2023 рр.), зокрема коефіцієнтів кореляції Пірсона між числом Вольфа, кліматичними параметрами (температурою, опадами, гідротермічним коефіцієнтом), викидами  $\text{CO}_2$  та категоріями ураження лісів (шкідниками, хворобами, погодними чинниками, пожежами, іншими причинами). Отримані результати засвідчили відсутність статистично значущих прямолінійних зв'язків між числом Вольфа та кліматичними індикаторами. Водночас виявлено сильні зв'язки із санітарним станом лісів: зокрема, сильну негативну кореляцію між  $W$  та загибеллю лісів від шкідників ( $r = -0,74$ ), а також позитивні лагові кореляції з хворобами ( $r = 0,79$ ) та несприятливими погодними умовами ( $r = 0,87$ ) на межі 2-х років. Додатково встановлено помірний позитивний зв'язок між загибеллю лісів і викидами  $\text{CO}_2$ , що свідчить про потенційний зворотний вплив деградаційних процесів на вуглецевий цикл. Результати підтверджують доцільність урахування позаземних (астрофізичних) чинників в екологічному моніторингу та плануванні адаптаційних заходів для збереження стійкості лісових екосистем у контексті зміни клімату. Практичне значення роботи полягає в потенційному використанні отриманих даних для покращення управління лісовими ресурсами, вдосконалення прогнозування ризиків загибелі лісів і розроблення стратегій адаптації до глобальних екологічних викликів.

**Ключові слова:** температура, опади, гідротермічний коефіцієнт, комахи-шкідники, хвороби, викиди  $\text{CO}_2$ , загибель лісів.

### ВСТУП

Останні десятиліття характеризуються значним зростанням кількості досліджень, присвячених впливу астрофізичних чинників, зокрема сонячної активності, на екосистеми Землі. Найбільше уваги зосереджено на вивченні механізмів, через які варіації сонячної активності впливають на атмосферну циркуляцію, кліматичні коливання, біологічні ритми та поведінку живих організмів. За даними К. Smith та ін., коливання сонячної активності корелюють зі змінами в глобальних кліматичних режимах [1]. Часто досліджується механізм взаємодії сонячного вітру з геомагнітним полем Землі, що, за В. Tinsley, впливає на формування хмар і, відповідно, на опади [2]. Роботи Н. Koch і Е. Cliver доповнюють ці гіпотези, описуючи

вплив варіацій сонячної радіації на середньострокову атмосферну циркуляцію [3].

Проблема впливу сонячної активності на лісові екосистеми набула особливої актуальності після публікацій Y. Vyklyuk та ін. і J. Gomes з M. Radovanovic, які виявили зростання частоти лісових пожеж у роки підвищеної сонячної активності [4; 5]. I. Usoskin зі співавтор., аналізуючи  $^{14}\text{C}$ -дані, продемонстрували довгострокові зміни сонячної активності та їхній зв'язок із температурними аномаліями [6]. Е. Bard і М. Frank разом із G. Bond та ін. простежили взаємозв'язок між інсоляцією та циркуляцією повітряних мас у Північній півкулі, що посилює аргументи на користь кліматичного значення сонячної активності в міжрічному та міжвіковому масштабах [7; 8].

У контексті вуглецевого обміну Y. Pan зі співавтор. підкреслюють, що ліси дедалі менш стабільно поглинають  $\text{CO}_2$ , а їхня деградація сприяє посиленню кліматичних змін [9]. Ці висновки доповнюють результати R. Seidl та ін., які показали, що стресові чинники, зокрема кліматичні, значно підвищують ризик загибелі лісів, особливо під впливом шкідників і хвороб [10]. Таким чином, деградація лісових екосистем на тлі сонячно-кліматичних флуктуацій може мати суттєві екологічні та біогеохімічні наслідки.

У XXI столітті, в умовах глобальних екологічних змін, спостерігається не лише зростання кількості екстремальних погодних явищ, а й ускладнення прогнозування природних процесів у біоценозах. Лісові екосистеми відіграють ключову роль у регуляції клімату, вуглецевого балансу та біорізноманіття, проте саме вони часто першими реагують на зміни глобального довкілля [11–13]. Тому дослідження чинників, що впливають на їхній санітарний стан, набуває пріоритетного значення.

На особливу увагу в цьому контексті заслуговує вплив сонячної активності як потенційного каталізатора змін у земному кліматі, циркуляції повітряних мас, частоті атмосферних фронтів і, відповідно, гідротермічних умов росту лісів [6; 14]. Актуальним є питання, чи можуть періодичні цикли сонячної активності, відображені числом Вольфа, мати відтерміновану дію на екологічну стійкість лісових масивів, включно з поширенням хвороб, шкідників і масштабами ураження від несприятливих погодних факторів [4].

**Метою нашого дослідження** є виявлення статистично значущих зв'язків між індексом Вольфа та основними кліматичними показниками, а також поширеними причинами загибелі лісів в Україні.

Для дослідження було використано два основні набори даних: щорічні значення індексу Вольфа за 1961–2023 роки та інформацію про площі загибелі лісів у 2010–2023 роках, розподілену за основними причинами: пошкодження шкідниками, хвороби, несприятливі погодні умови, лісові пожежі та інші чинники. Крім того, враховано кліматичні показники — середньорічну температуру, кількість опадів і гідротермічний коефіцієнт (далі — ГТК). Уперше проведено комплексну оцінку з урахуванням лагових ефектів (1–3 роки), що дозволяє дослідити потенційну інерційність реакцій лісових екосистем на зміни сонячної активності.

Отримані результати мають практичне значення для моделювання лісових ризиків і розроблення адаптаційних стратегій у контексті глобальних змін.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасній науковій літературі спостерігається зростання кількості досліджень, які підтверджують складний взаємозв'язок між сонячною активністю та екологічними змінами на Землі. E. Bard і M. Frank доводять, що варіації інсоляції здатні спричиняти зміни в атмосферній циркуляції, впливаючи таким чином на клімат середніх широт [7]. Аналогічні висновки зробили G. Bond та ін., які на основі морських осадових проксі ідентифікували періоди потепління, пов'язані з підвищенням сонячної активності протягом голоцену [8]. S. Solanki зі співавтор., а також I. Usoskin та ін. показали, що за останні тисячоліття Сонце демонструвало кілька різних режимів активності, які корелювали з довготривалими кліматичними трендами, впливаючи на гідротермічний режим, опади та температуру, що безпосередньо впливає на життєздатність лісових екосистем [6; 14]. Зокрема, періоди мінімальної сонячної активності, як-от мінімум Маундера, асоціюються з похолоданнями, що могли підвищувати вразливість екосистем до патогенів.

Дослідження Y. Vuklyuk зі співавтор., а також J. Gomes та ін. вказують на зв'язок між сонячною активністю та збільшенням частоти лісових пожеж, оскільки висока активність сприяє підвищенню температури та зниженню вологості рослинності, що підвищує її займистість [4; 5]. У регіонах із сезонним дефіцитом опадів це призводить до зростання пожежної небезпеки, що загрожує біомасі та екологічним ланцюгам. B. Tinsley підкреслює роль сонячного вітру у зміні електричних властивостей атмосфери, що опосередковано впливає на хмаротворення та опади [2].

У сфері вуглецевого балансу Y. Pan та ін. зазначають, що ліси залишаються основними поглиначами  $\text{CO}_2$ , проте їхня стійкість знижується під впливом стресових чинників [9]. R. Seidl та ін. доводять, що кліматичні порушення, зокрема екстремальні погодні явища та патогенні навантаження, значно підвищують ризик деградації лісів, зменшуючи потенціал поглинання вуглецю та збільшуючи викиди  $\text{CO}_2$  через розклад мертвої біомаси [10]. Ці процеси формують зворотний зв'язок, у якому зниження фітобіомаси лісу підсилює концентрацію парникових газів, що, своєю чергою, сприяє подальшим кліматичним змінам.

У Шостому оціночному звіті ІРСС наголошується на необхідності глибокого розуміння ролі природних чинників, зокрема сонячної активності, у формуванні глобальних кліматичних процесів [13]. L. Svalgaard і E. Cliver розробили методику реконструкції довгострокової соняч-

ної активності на основі геомагнітних індексів, що є важливим інструментом для інтеграції астрономічних змін у кліматичне моделювання [15]. Урахування таких реконструкцій у регіональних сценаріях дозволяє точніше оцінити роль природної варіабельності при інтерпретації змін температури, вологості та енергетичного балансу в біосфері.

Незважаючи на численні фундаментальні дослідження, прикладна оцінка впливу сонячної активності на санітарний стан лісів, особливо з урахуванням часових лагів у регіональному контексті, залишається обмеженою. Більшість попередніх робіт зосереджені на загальних кліматичних наслідках або на окремих компонентах лісу, не враховуючи комплексної екосистемної реакції. Тому запропоноване дослідження має на меті емпірично перевірити ці взаємозв'язки в українських лісових екосистемах, застосовуючи нові статистичні методи аналізу для доповнення наявних наукових підходів.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому дослідженні використано два основні масиви даних. Перший — щорічні значення числа Вольфа, що є індексом сонячної активності, отримані з відкритих астрономічних архівів за 1961–2023 роки. Число Вольфа традиційно розраховується як сума кількості індивідуальних сонячних плям і десятикратного числа груп плям, що забезпечує надійний кумулятивний показник загального рівня сонячної активності. Для забезпечення однорідності аналізу погодинні дані були усереднені до річних значень.

Другий масив містить статистичні дані про загибель лісів в Україні за 2010–2023 роки з розподілом за основними причинами: пошкодження шкідниками, ураження хворобами, вплив несприятливих погодних умов, лісові пожежі та інші чинники. Джерелом цих даних були щорічні державні звіти про стан лісового фонду та екосистемний моніторинг, що здійснюються профільними державними установами.

Для побудови моделей також використано кліматичні параметри: середньорічну температуру повітря, суму опадів (отримано з національних метеорологічних служб і супутникового моніторингу), та гідротермічний коефіцієнт (ГТК за Селяніновим), розрахований за формулою 1:

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

де  $R$  — сума опадів за період із середньодобовими температурами вище  $+10^\circ\text{C}$  (у мм);

$\sum T$  — сума активних температур за той самий період ( $^\circ\text{C}$ ).

Крім того, включено дані про щорічні викиди  $\text{CO}_2$  (тис. т), що відображають інтенсивність антропогенного навантаження на екосистеми та можуть взаємодіяти зі змінами клімату.

Аналітичну роботу виконано в кілька етапів. Спочатку проведено описовий аналіз із побудовою гістограм і діаграм розсіювання для первинного виявлення потенційних зв'язків. Далі обчислено парні коефіцієнти кореляції Пірсона між числом Вольфа та іншими змінними для виявлення лінійних взаємозв'язків.

Другий етап передбачав дослідження лагових ефектів, тобто відтермінованого впливу сонячної активності на інші змінні через 1, 2 та 3 роки, за допомогою зміщеної кореляції з відповідними часовими зсувами. Такий підхід дає змогу виявити потенційну інерційність екологічної відповіді на астрономічні чинники, що відповідає сучасним методологіям вивчення часових лагів у кліматичних даних.

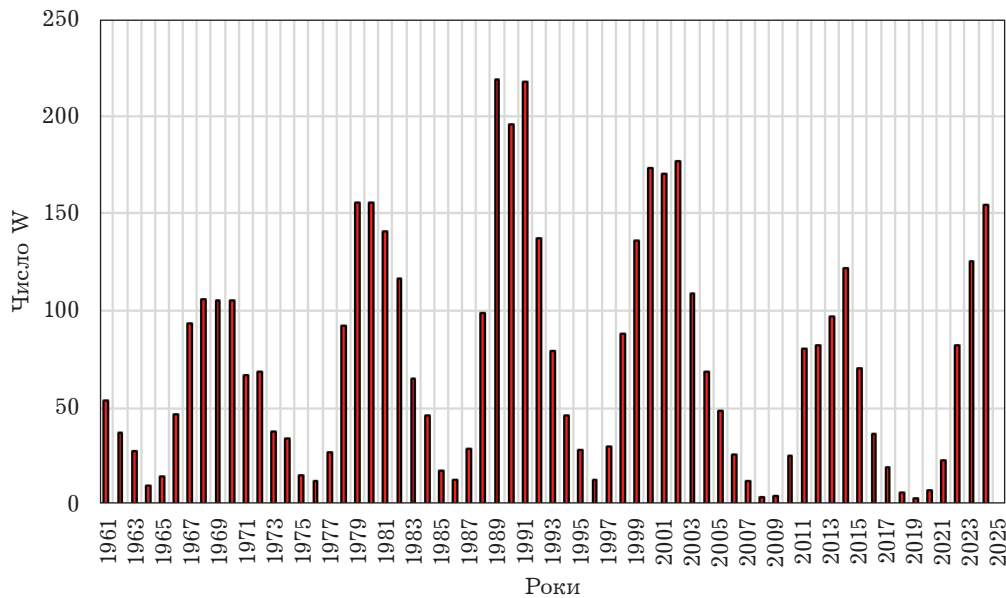
Усі розрахунки виконано з використанням мови програмування Python із додатковою верифікацією в Microsoft Excel. Результати подано у вигляді таблиць і графіків, що ілюструють як безпосередні, так і лагові кореляційні зв'язки. Для кожного етапу аналізу проведено інтерпретацію з урахуванням статистичної значущості ( $p < 0,05$ ) та розроблено кілька сценаріїв тлумачення лагових зв'язків залежно від сили і напрямку кореляцій.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Число Вольфа є важливим показником сонячної активності, що визначає кількість сонячних плям і має середню тривалість циклів приблизно 11 років. Представлений графік (рис. 1) демонструє зміни числа Вольфа ( $W$ ) протягом 1961–2023 років, що характеризує сонячну активність у вигляді циклічних коливань.

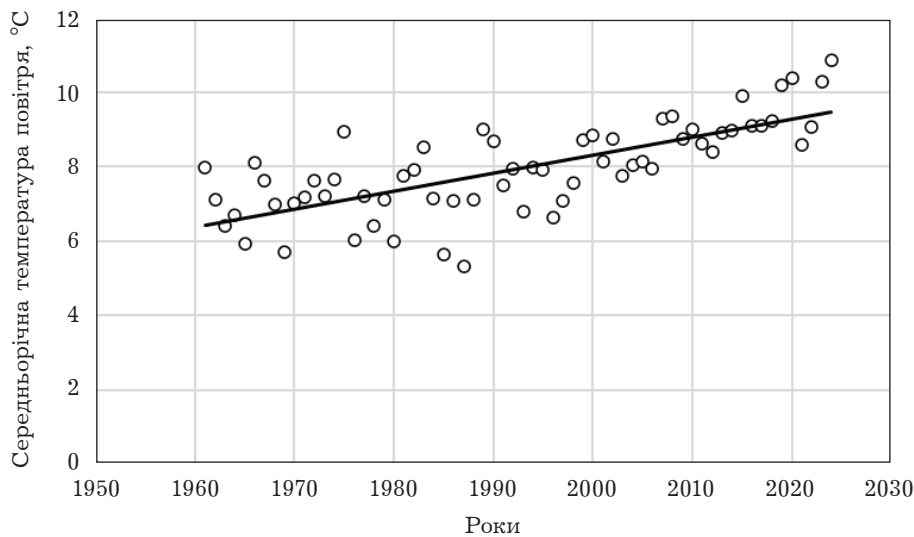
На графіку чітко прослідковується циклічність із періодами високої (піки 1979–1981, 1989–1991, 2000–2002) та низької активності (мінімуми 1964–1965, 1975–1976, 1985–1986, 1996–1997, 2007–2009, 2018–2020). Особливо високі значення числа Вольфа відзначені на межі 1980-х та 1990-х років, а також на початку 2000-х, що відповідає найінтенсивнішим фазам сонячних циклів.

Сьогодні глобальні зміни клімату, спричинені антропогенним чинником, є загально-визнаним явищем і впливають на всі природні екосистеми, зокрема на ліси, змінюючи умови їхнього зростання та санітарний стан. Графік на рис. 2 демонструє динаміку середньорічної



**Рис. 1.** Динаміка числа Вольфа (сонячної активності) за 1961–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.



**Рис. 2.** Динаміка середньорічної температури повітря за 1961–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

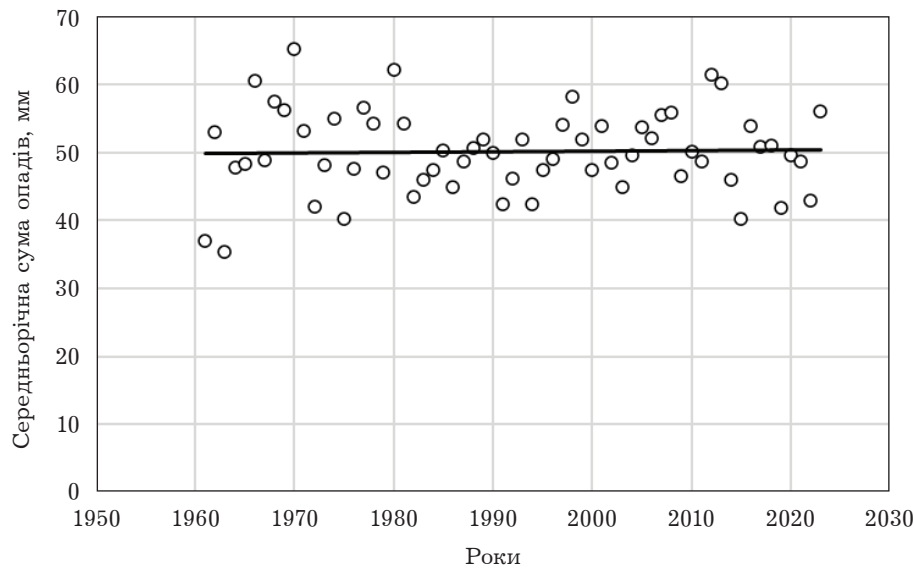
температури повітря за 1961–2023 роки, що є ключовим показником змін клімату та важливим фактором, який впливає на стан і продуктивність лісових екосистем.

На представленому графіку чітко помітний тренд зростання середньорічної температури протягом аналізованого періоду. Зокрема, середні значення температури піднялися приблизно з 6–7°C у 1960–1970-х роках до 9–10°C на початку 2020-х. Це свідчить про суттєве потепління клімату, що може посилювати стресові чинники для лісів, сприяючи поширенню шкідників, збудників хвороб, а також підви-

щуючи ризик лісових пожеж та екстремальних погодних явищ.

Графік на *рис. 3* представляє динаміку змін середньорічної суми опадів протягом 1961–2023 років. Показник кількості опадів є одним із важливих кліматичних параметрів, що визначають стан і продуктивність лісових екосистем. Умови вологості впливають на фізіологічні процеси рослин, поширення хвороб і шкідників, а також визначають ризики екстремальних явищ, таких як посухи та лісові пожежі.

Аналіз графіка показує, що впродовж усього досліджуваного періоду спостерігається



**Рис. 3.** Динаміка середньорічної суми опадів за 1961–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

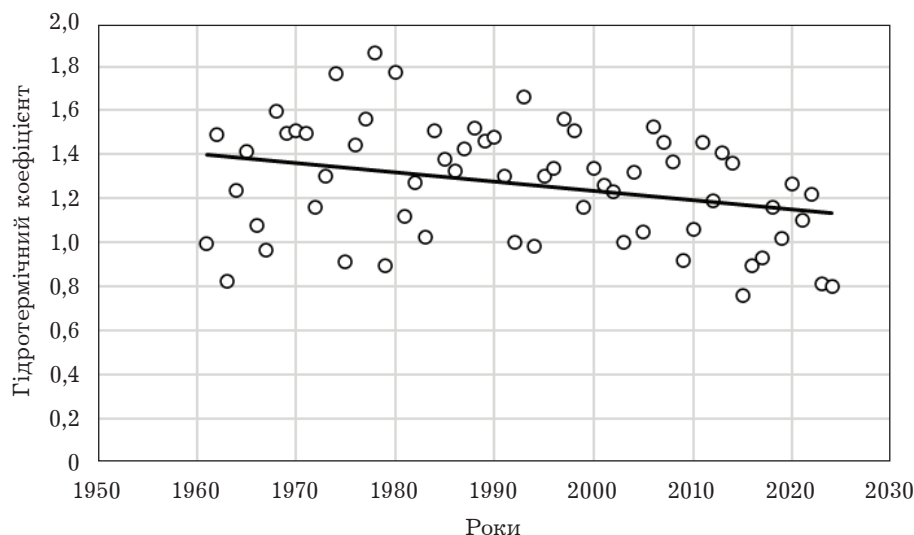
незначна варіабельність середньорічної суми опадів навколо стабільної середньої величини (приблизно 50 мм). Тренд до істотного збільшення чи зменшення опадів за цей період не простежується. Проте можна відзначити окремі роки з більш високими або низькими показниками, що свідчить про посилення нерівномірності в розподілі опадів і може створювати додаткові стресові умови для лісів.

Відсутність вираженого тренду щодо опадів вказує на те, що зростання температури, зафіксоване на попередньому графіку (рис. 2), не супроводжується адекватним збільшенням опадів, що може підсилювати ризик посух і погіршення водного балансу лісових екосистем. Це

є важливим аспектом, який варто враховувати при прогнозуванні майбутніх станів лісів та розробленні адаптаційних заходів.

Рисунок 4 демонструє зміни гідротермічного коефіцієнта Селянінова з 1961 до 2023 року. ГТК є важливим інтегральним показником, що одночасно враховує умови вологості та температурного режиму, визначаючи забезпеченість рослин вологою у відношенні до їхніх теплових потреб. Значення ГТК понад 1,0 свідчать про достатнє зволоження, тоді як нижчі значення можуть сигналізувати про ризики посушливих умов, небезпечних для лісових екосистем.

Аналізуючи представлений графік, можна спостерігати поступове зниження значень



**Рис. 4.** Динаміка гідротермічного коефіцієнта за 1961–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

ГТК — із середнього рівня приблизно 1,4–1,5 у 1960–1970-х роках до майже 1,0–1,1 в останні роки досліджуваного періоду. Це зниження свідчить про поступове погіршення гідротермічних умов, зокрема, через зростання температур за умов недостатньої компенсації кількістю опадів.

Ця тенденція зменшення ГТК є важливою, оскільки вона вказує на зростаючі ризики для лісових насаджень, які стають більш уразливими до посух, стресів та екстремальних погодних явищ. У подальших дослідженнях важливо враховувати цю тенденцію для розроблення адаптаційних заходів і запобігання негативним наслідкам змін клімату для лісових екосистем.

Згідно з наведеними даними (табл. 1), коефіцієнти кореляції між числом Вольфа (індексом сонячної активності) та основними кліматичними показниками — середньорічною температурою повітря ( $r = 0,10$ ), сумою опадів ( $r = 0,12$ ) і гідротермічним коефіцієнтом ( $r = 0,06$ ) — є надзвичайно низькими, що свідчить про дуже слабкий або фактично відсутній прямий зв'язок сонячної активності з цими кліматичними параметрами у 1961–2023 роках. Це означає, що зміни сонячної активності не мають статистично значущого негайного впливу на температуру, опади чи водний баланс у досліджуваному регіоні.

Водночас між середньорічною температурою повітря та ГТК виявлено помірно сильний негативний зв'язок ( $r = -0,51$ ), що вказує на те, що підвищення температури часто супроводжується погіршенням водного балансу і збільшенням ризику посушливих умов. Середньорічна сума опадів має помірний позитивний зв'язок із ГТК ( $r = 0,48$ ), що логічно, оскільки ГТК відображає співвідношення опадів і температури.

Таким чином, на основі наданих даних, вплив сонячної активності, вираженої числом Вольфа, на ключові кліматичні параметри, такі як температура повітря, кількість опадів і гід-

ротермічний коефіцієнт, є надзвичайно слабким або практично відсутнім. Це свідчить про відсутність статистично значущого прямого зв'язку між змінами сонячної активності та зазначеними кліматичними показниками протягом досліджуваного періоду (1961–2023 рр.) або про його мінімальну вираженість.

Додатково було проаналізовано наявність часових затримок між числом Вольфа та основними кліматичними показниками — температурою, опадами, гідротермічним коефіцієнтом Селянінова — із використанням лагів від 0 до 3 років (рис. 5).

На графіку відображено динаміку коефіцієнтів кореляції між числом Вольфа як показником сонячної активності та ключовими кліматичними параметрами (температурою повітря, сумою опадів, гідротермічним коефіцієнтом) із часовими затримками від 0 до 3 років. Це дає змогу виявити можливі відтерміновані ефекти впливу сонячної активності на кліматичні умови.

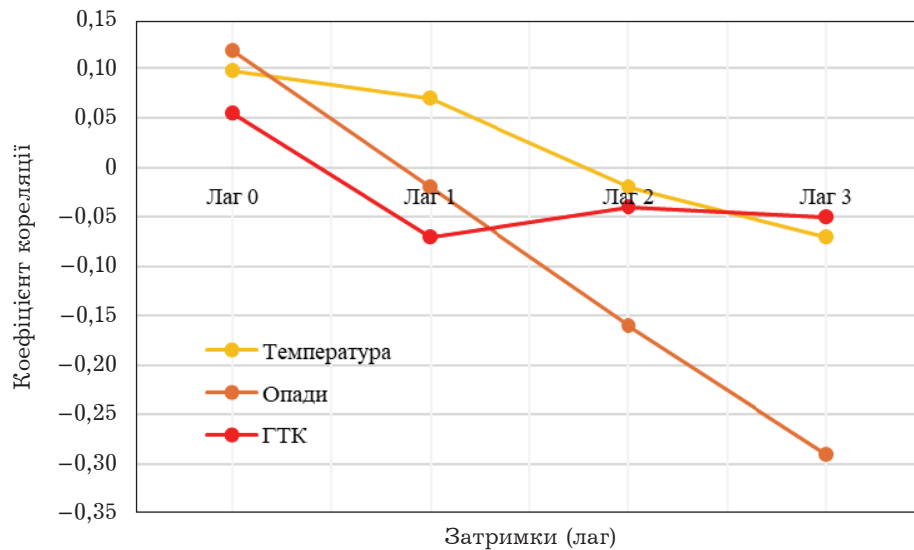
Для показника опадів спостерігається чітке зниження коефіцієнта кореляції зі збільшенням лага: від позитивного значення на початковому етапі (лаг 0,  $r = 0,11$ ) до помірно негативного на третьому році затримки (лаг 3,  $r = -0,29$ ). Це вказує на поступове посилення негативного впливу сонячної активності на кількість опадів із часовою затримкою. Температура повітря демонструє слабкий позитивний зв'язок із числом Вольфа на початку ( $r = 0,10$ ), з подальшим зниженням до слабо негативного ( $r \approx -0,07$ ), що також свідчить про наявність відтермінованого ефекту. Гідротермічний коефіцієнт характеризується низькими значеннями кореляції, що коливаються близько нуля (від  $r = 0,01$  до  $r = -0,05$ ), вказуючи на слабку або майже відсутню чутливість до сонячної активності. Таким чином, аналіз графіка підтверджує, що найбільш виражений лаговий ефект сонячної активності спостерігається для кількості опадів, що підкреслює потенціал використання числа Вольфа

Таблиця 1

**Кореляційні зв'язки між числом Вольфа (W), температурою повітря, сумою опадів і гідротермічним коефіцієнтом (ГТК)**

| Показники                             | Число W | Середньорічна температура повітря, °C | Середньорічна сума опадів, мм | ГТК  |
|---------------------------------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------|------|
| Число W                               | 1,00    | —                                     | —                             | —    |
| Середньорічна температура повітря, °C | 0,10    | 1,00                                  | —                             | —    |
| Середньорічна сума опадів, мм         | 0,12    | -0,09                                 | 1,00                          | —    |
| ГТК (гідротермічний коефіцієнт)       | 0,06    | -0,51                                 | 0,48                          | 1,00 |

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.



**Рис. 5.** Динаміка коефіцієнтів кореляції між числом Вольфа (W) та кліматичними показниками із затримкою від 0 до 3 років

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

для довгострокового прогнозування водного балансу, важливого для управління лісовими екосистемами та оцінки ризиків посух.

Періоди зниженої сонячної активності збігаються зі зростанням вразливості лісових екосистем до біотичних ушкоджень, зокрема спричинених шкідниками, що підкреслює необхідність подальшого дослідження таких взаємозв'язків. Динаміка цього показника відіграє важливу роль у прогнозуванні екологічних ризиків, пов'язаних із впливом космічних факторів на стан лісів.

Графік на рис. 6 ілюструє зміни площ загибелі лісів в Україні у 2010–2023 рр. за різними причинами: ураження шкідливими комахами, захворювання лісів, несприятливі погодні умови, лісові пожежі та інші фактори. Цей аналіз дає змогу виявити основні чинники, що спричиняють найбільші втрати лісових масивів, а також простежити їхню динаміку в часі.

Найвищі піки загибелі лісів зафіксовано у 2017, 2018, 2019 та 2022 роках. У ці періоди домінували ураження шкідливими комахами та лісові пожежі, причому особливо значними були площі, уражені пожежами у 2022 році та шкідниками у 2017–2019 роках.

Підвищені втрати лісів від несприятливих погодних умов спостерігалися у 2012–2016 роках, що, ймовірно, пов'язано з екстремальними погодними явищами, такими як посухи, буревії чи аномальні опади.

Захворювання лісів характеризуються порівняно стабільною динамікою з періодичними сплесками, найбільші з яких припадають на 2015 та 2016 роки.

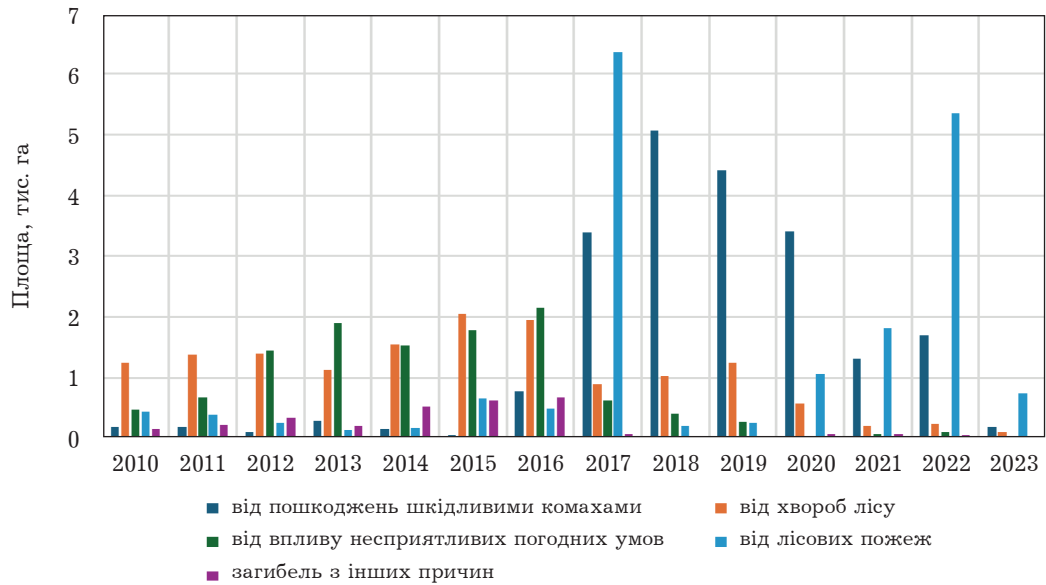
Загибель лісів з інших причин (техногенних, антропогенних факторів) має менші масштаби, але є стабільно наявною протягом усього періоду дослідження.

Отже, аналіз динаміки свідчить, що лісові пожежі та шкідники є основними чинниками загибелі лісових насаджень останнім часом. Ці дані мають важливе значення для розроблення стратегій управління лісами, спрямованих на профілактику пожеж, боротьбу зі шкідниками та адаптацію до кліматичних змін.

Таблиця 2 містить коефіцієнти кореляції між числом Вольфа (показником сонячної активності), середньорічними кліматичними параметрами, обсягами викидів CO<sub>2</sub> та різними причинами загибелі лісів за 2010–2023 роки.

Виявлено значну негативну кореляцію між числом Вольфа (W) та загибеллю лісів унаслідок ураження шкідливими комахами ( $r = -0,74$ ), що свідчить про зростання ризику масових біотичних пошкоджень лісів за умов низької сонячної активності. Спостерігається помірна позитивна кореляція із загибеллю лісів через несприятливі погодні умови ( $r = 0,34$ ), що може свідчити про зв'язок сонячної активності з виникненням екстремальних погодних явищ. Кореляція з температурою повітря є слабкою і негативною ( $r = -0,16$ ), тоді як із кількістю опадів ( $r = 0,24$ ) та гідротермічним коефіцієнтом (ГТК) ( $r = 0,20$ ) виявлено слабкі позитивні зв'язки.

Середньорічна температура повітря має помітну негативну кореляцію з ГТК ( $r = -0,46$ ) та викидами CO<sub>2</sub> ( $r = -0,49$ ), що може вказувати на посилення кліматичних ризиків і зростання

**Рис. 6.** Динаміка площі загибелі лісів за причинами у 2010–2023 рр.

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

Таблиця 2

**Кореляційна матриця взаємозв'язків між числом Вольфа, кліматичними показниками, викидами CO<sub>2</sub> та причинами загибелі лісів за 2010–2023 рр.**

| Показники                                                      | Число W | Середньорічна температура повітря, °С | Середньорічна сума опадів, мм | ГТК   | Викиди CO <sub>2</sub> , тис. т | Загибель лісів від пошкоджень шкідливими комахами, тис. га | Загибель лісів від хвороб лісу, тис. га | Загибель лісів від впливу несприятливих погодних умов, тис. га | Загибель лісів від лісових пожеж, тис. га | Загибель з інших причин, тис. га |
|----------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------|-------------------------------|-------|---------------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
| Число W                                                        | 1,00    | –                                     | –                             | –     | –                               | –                                                          | –                                       | –                                                              | –                                         | –                                |
| Середньорічна температура повітря, °С                          | –0,16   | 1,00                                  | –                             | –     | –                               | –                                                          | –                                       | –                                                              | –                                         | –                                |
| Середньорічна сума опадів, мм                                  | 0,24    | –0,33                                 | 1,00                          | –     | –                               | –                                                          | –                                       | –                                                              | –                                         | –                                |
| ГТК                                                            | 0,20    | –0,46                                 | 0,18                          | 1,00  | –                               | –                                                          | –                                       | –                                                              | –                                         | –                                |
| Викиди CO <sub>2</sub> , тис. т                                | 0,32    | –0,49                                 | 0,31                          | 0,43  | 1,00                            | –                                                          | –                                       | –                                                              | –                                         | –                                |
| Загибель лісів від пошкоджень шкідливими комахами, тис. га     | –0,74   | 0,37                                  | –0,27                         | –0,05 | –0,58                           | 1,00                                                       | –                                       | –                                                              | –                                         | –                                |
| Загибель лісів від хвороб лісу, тис. га                        | 0,01    | –0,15                                 | –0,09                         | –0,08 | 0,57                            | –0,25                                                      | 1,00                                    | –                                                              | –                                         | –                                |
| Загибель лісів від впливу несприятливих погодних умов, тис. га | 0,34    | –0,31                                 | 0,26                          | 0,00  | 0,50                            | –0,48                                                      | 0,81                                    | 1,00                                                           | –                                         | –                                |
| Загибель лісів від лісових пожеж, тис. га                      | –0,14   | –0,09                                 | –0,22                         | –0,16 | –0,53                           | 0,26                                                       | –0,44                                   | –0,33                                                          | 1,00                                      | –                                |
| Загибель з інших причин, тис. га                               | 0,30    | –0,19                                 | –0,06                         | –0,15 | 0,39                            | –0,53                                                      | 0,83                                    | 0,87                                                           | –0,33                                     | 1,00                             |

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

емісії  $\text{CO}_2$  у періоди підвищених температур. Кількість опадів позитивно корелює з викидами  $\text{CO}_2$  ( $r = 0,31$ ) і негативно — з ураженням лісів комахами ( $r = -0,27$ ), підкреслюючи роль достатнього зволоження у зниженні біотичних ризиків.

Спостерігається сильна позитивна кореляція між викидами  $\text{CO}_2$  та загибеллю лісів через хвороби ( $r = 0,57$ ), несприятливі погодні умови ( $r = 0,50$ ), а також помірна — з іншими причинами загибелі ( $r = 0,39$ ). Це свідчить про взаємозв'язок, за якого масова загибель лісів сприяє збільшенню викидів  $\text{CO}_2$ , а високий рівень емісії  $\text{CO}_2$  може опосередковано вказувати на погіршення стану лісових екосистем.

Лісові пожежі демонструють негативну кореляцію з викидами  $\text{CO}_2$  ( $r = -0,53$ ), що може бути зумовлено тимчасовим зменшенням лісової біомаси після пожеж, знижуючи загальний рівень емісії вуглецю в регіоні.

Отримані результати підкреслюють важливість урахування сонячної активності, кліматичних змін та викидів  $\text{CO}_2$  для аналізу і прогнозування санітарного стану лісових екосистем. Особливо значущими є виявлені взаємозв'язки між сонячною активністю, кліматичними чинниками та біотичними загрозами (шкідниками, хворобами), які можуть бути використані для розроблення стратегій адаптації лісових екосистем до майбутніх кліматичних й екологічних викликів.

Для оцінки відтермінованих ефектів сонячної активності на кліматичні та біоекологічні параметри було виконано лаговий аналіз із часовими зсувами на 1, 2 та 3 роки. На рис. 7 представлено коефіцієнти кореляції Пірсона

між числом Вольфа ( $W$ ), що характеризує сонячну активність, та такими показниками, як середньорічна температура повітря, кількість опадів, гідротермічний коефіцієнт (ГТК), викиди  $\text{CO}_2$ , а також причини загибелі лісів.

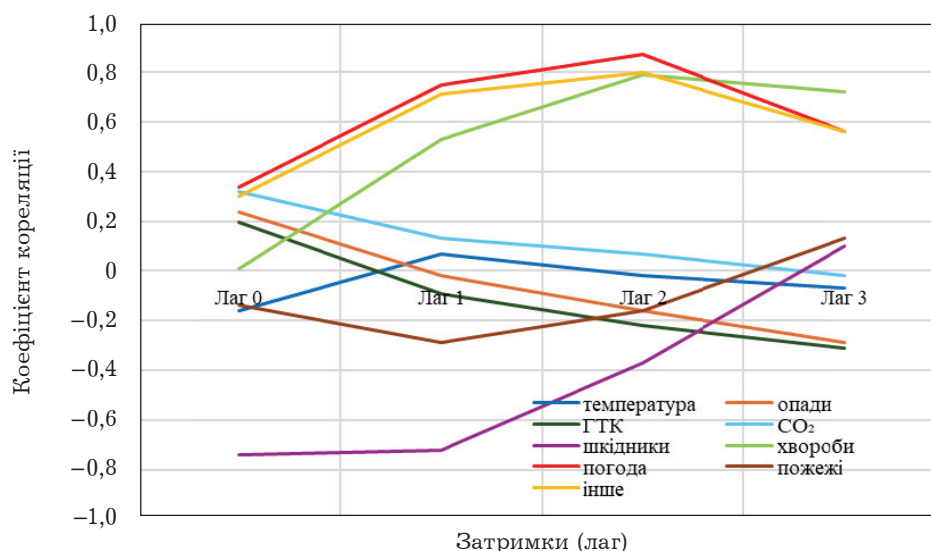
Середньорічна температура повітря демонструє незначну негативну кореляцію з числом Вольфа, яка слабшає протягом трьох років лагу (від  $r = 0,07$  до  $r = -0,07$ ). Це свідчить про відсутність помітного прямого чи відтермінованого впливу сонячної активності на термічні умови регіону.

Кількість опадів характеризується поступовим зниженням кореляції: від слабкої позитивної при лагу 1 ( $r = -0,02$ ) до помірно негативної при лагу 3 ( $r = -0,29$ ). Така динаміка вказує на можливість відтермінованого впливу сонячної активності на гідрологічні умови, який стає більш вираженим через 2–3 роки.

Гідротермічний коефіцієнт, що відображає рівень вологозабезпечення, демонструє найбільш виражену негативну кореляцію при лагу 3 ( $r = -0,31$ ). Це може свідчити про поступове погіршення умов водозабезпечення після періодів підвищеної сонячної активності.

Кореляція між числом Вольфа та викидами  $\text{CO}_2$  залишається слабкою, але позитивною, досягаючи максимуму при лагу 1 ( $r = 0,13$ ).

Щодо причин загибелі лісів, найсильніший негативний зв'язок спостерігається між числом Вольфа при лагу 1 та ураженнями лісів шкідниками ( $r = -0,72$ ). Це підтверджує припущення, що зниження сонячної активності сприяє активізації шкідників із затримкою в один рік. Натомість загибель лісів від хвороб ( $r = 0,79$ ) і несприятливих погодних умов



**Рис. 7.** Лагова кореляція між числом Вольфа та екологічними показниками

Джерело: сформовано на основі власних досліджень.

( $r = 0,87$ ) досягає пікових значень кореляції при лагу 2, що може відображати накопичувальний ефект кліматичних аномалій, пов'язаних із попередньою сонячною активністю.

Загибель лісів з інших причин, таких як техногенні чи комплексні фактори, також має високу кореляцію з числом Вольфа при лагу 2 ( $r = 0,80$ ), що вказує на опосередкований вплив сонячної активності через широкий спектр чинників.

Лісові пожежі не демонструють чіткого зв'язку з числом Вольфа: кореляція варіює від слабкої негативної при лагу 1 ( $r = -0,29$ ) до слабкої позитивної при лагу 3 ( $r = 0,13$ ). Це може свідчити про більшу залежність цього показника від антропогенних або локальних кліматичних умов.

Проведений аналіз показав, що найвиразніші лагові зв'язки між сонячною активністю та екологічними показниками проявляються із затримкою в 1–2 роки. Особливо значущими є залежності, виявлені для уражень лісів шкідниками (лаг 1), а також для пошкоджень від хвороб і погодних стресів (лаг 2). Ці результати підкреслюють інерційність реакції лісових екосистем на позаземні фактори, що потребує врахування при розробленні прогнозних моделей і стратегій адаптаційного управління лісовими ресурсами.

Результати проведеного дослідження розкривають складну природу взаємозв'язків між сонячною активністю, оціненою через число Вольфа, та санітарним станом лісових екосистем в Україні, підкреслюючи наявність відтермінованих ефектів. Виявлено значну негативну кореляцію між числом Вольфа та загибеллю лісів від шкідників ( $r = -0,74$ ), а також помітні лагові зв'язки із затримкою в 1–2 роки, що вказує на опосередкований характер впливу сонячної активності. Цей вплив, ймовірно, реалізується через зміни кліматичних параметрів, таких як температура, вологість і гідротермічний баланс.

Ці спостереження узгоджуються з попередніми науковими працями. Наприклад, K. Smith та ін. наголошували на можливому впливі коливань сонячної активності на струменеві течії та атмосферну циркуляцію, тоді як В. Tinsley та Н. Koch з Е. Cliver акцентували на ролі сонячного вітру та радіаційних змін у формуванні глобальних погодних моделей [1–3]. Щодо лісових пожеж і біотичних загроз, результати Y. Vyklyuk та ін. і J. Gomes та співавтор. вказують на зростання їхньої частоти під час піків сонячної активності [4; 5]. Проте наше дослідження виявило протилежну тенденцію: зниження сонячної активності асоціюється з активізацією шкідників, що може бути пов'язано

з послабленням стійкості дерев за несприятливих умов. Цей висновок підтверджується працями Y. Pan зі співавт. та R. Seidl та ін., які показали, що кліматичні стреси підвищують вразливість лісів до біотичних ушкоджень [9; 10].

Особливо цінним є виявлення відтермінованих ефектів: максимальні коефіцієнти кореляції для загибелі лісів від хвороб ( $r = 0,79$ ) і несприятливих погодних умов ( $r = 0,87$ ) спостерігаються з лагом у 2 роки. Це свідчить про інерційність екосистемної відповіді, коли вплив сонячної активності проявляється через накопичення фізіологічного та екологічного стресу. Подібна динаміка згадується в роботах I. Usoskin та ін., які пов'язують цикли сонячної активності з кліматичними аномаліями [6].

Дослідження зв'язку між числом Вольфа та викидами  $\text{CO}_2$  підкреслює роль біофізичних процесів у вуглецевому циклі. Позитивна кореляція між викидами  $\text{CO}_2$  та загибеллю лісів через хвороби, несприятливі погодні умови та інші причини вказує на зворотний зв'язок: деградація лісів знижує їхню здатність поглинати вуглець, що сприяє накопиченню парникових газів в атмосфері. Цей висновок підтверджується дослідженнями Y. Pan зі співавт., які відзначають глобальне зниження абсорбційної здатності лісів, та R. Seidl та ін., які пов'язують деградацію лісів із кліматичними та біотичними стресами [9; 10].

Результати дослідження також демонструють, що вплив сонячної активності на санітарний стан лісів є багатограним і проявляється як безпосередньо, так і через лагові ефекти. Найвиразнішим є зв'язок із активністю шкідників, де сильна негативна кореляція з числом Вольфа спостерігається як у безпосередньому періоді досліджень, так і з лагом в 1 рік. Це може бути зумовлено послабленням імунної стійкості дерев у періоди низької сонячної активності, що узгоджується з висновками K. Smith зі співавт., I. Usoskin зі співавтор. та S. Solanki та ін. щодо ролі сонячної активності в регіональних кліматичних змінах [1; 6; 14].

Значний лаговий ефект із затримкою у 2 роки, виявлений для загибелі лісів від погодних умов і хвороб, підтримує гіпотезу про поступові зміни кліматичних умов (опадів, вологості, температури) під впливом сонячної активності, які створюють сприятливе середовище для патогенів і кліматичних стресів. Ці ефекти перегукуються з палеокліматичними реконструкціями G. Bond зі співавтор., де сонячна активність корелювала з періодами кліматичних аномалій [8]. Крім того, висновки В. Tinsley про вплив космічного випромінювання на хмарність і Н. Koch з Е. Cliver про зміни атмо-

сферної циркуляції під дією сонячного вітру додатково підтверджують зв'язок сонячної активності з атмосферними процесами [2; 3].

Отже, наше дослідження узгоджується із сучасними теоретичними й емпіричними підходами до вивчення впливу сонячної активності на біосферу, доповнюючи їх кількісним аналізом. Використання числа Вольфа як індикатора опосередкованих ризиків для лісових екосистем демонструє перспективність удосконалення прогностичних моделей санітарного стану лісів в умовах глобальних кліматичних змін. Отримані дані підкреслюють необхідність урахування лагових ефектів при розробленні ефективних стратегій адаптації лісгосподарства до сучасних екологічних викликів.

### ВИСНОВКИ

Дослідження встановило наявність статистично значущих зв'язків між числом Вольфа та станом лісових екосистем. Найсильніший зв'язок спостерігається у вигляді негативної кореляції із загибеллю лісів від шкідників.

Аналіз із лагами виявив затримані ефекти сонячної активності на кліматичні умови та пошкодження лісів. Зокрема, найвищі значення кореляцій зафіксовано через 2 роки для погод-

них ушкоджень ( $r = 0,87$ ) і хвороб ( $r = 0,79$ ), а через 3 роки — для загальної площі загибелі лісів ( $r = 0,59$ ).

Виявлено потенційний зв'язок між сонячною активністю та динамікою опадів із лагом у 3 роки, що вказує на можливий відтермінований вплив на гідрологічні умови та водний баланс.

Встановлено важливу роль викидів  $\text{CO}_2$  як показника зворотного зв'язку: підвищення загибелі лісів через кліматичні та біотичні чинники супроводжується зростанням викидів парникових газів, що може посилювати кліматичну кризу.

Отримані результати підтверджують актуальність інтеграції космічних чинників в екологічне моделювання та формування лісгосподарських стратегій, особливо в контексті адаптації до змін клімату.

Перспективними напрямками подальших досліджень є розширення часової вибірки, регіональний аналіз, моделювання з урахуванням нелінійних ефектів, а також вивчення міжфакторної взаємодії між сонячною активністю, атмосферою циркуляцією, викидами парникових газів і станом лісів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Smith K. R., Woodward A., Campbell-Lendrum D. et al. Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press; New York, NY, USA, 2014. P. 709–754. URL: <https://www.kirksmith.org/publications/2014/10/15/ipcc-2014-wgii-chapter-11-human-health-impacts-adaptation-and-co-benefits> (accessed: 24.06.2025).
2. Tinsley B. A. Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the troposphere. *Space Science Reviews*. 2000. Vol. 94 (1–2). P. 231–258. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1026797127105>
3. Koch H. W., Cliver E. W. A historical review of major solar-terrestrial relationships. *Advances in Space Research*. 2006. Vol. 37 (8). P. 1421–1430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.02.007>
4. Vyklyuk Y., Radovanović M. M., Stanojević G. et al. Connection of Solar Activities and Forest Fires in 2018: Events in the USA (California), Portugal and Greece. *Sustainability*. 2020. Vol. 12 (24), 10261. <https://doi.org/10.3390/su122410261>
5. Gomes J. F. P., Radovanovic M. Solar activity as a possible cause of large forest fires — a case study: Analysis of the Portuguese forest fires. *Science of the Total Environment*. 2008. Vol. 394 (1). P. 197–205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.01.040>
6. Usoskin I. G., Hulot G., Gallet Y. et al. Evidence for distinct modes of solar activity. *Astronomy & Astrophysics*. 2014. Vol. 562. L10. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423391>
7. Bard E., Frank M. Climate change and solar variability: What's new under the sun? *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. Vol. 248 (1–2). P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.06.016>
8. Bond, G., Kromer, B., Beer, J. et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*. 2001. Vol. 294 (5549). P. 2130–2136. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1065680>
9. Pan Y., Birdsey R. A., Fang J. et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. 2011. Vol. 333 (6045). P. 988–993. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
10. Seidl R., Schelhaas M. J., Rammer W., Verkerk P. J. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*. 2014. Vol. 4 (9). P. 806–810. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2318>
11. Allen C. D., Macalady A. K., Chenchouni H. et al. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*. 2010. Vol. 259 (4). P. 660–684. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
12. Climate Change 2014. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. *IPCC*. Cambridge Univ. Press, 2014. 1150 p. URL: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf) (accessed: 24.06.2025).

13. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*. 2021. URL: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (accessed: 24.06.2025).
14. Solanki S. K., Usoskin I. G., Kromer B. et al. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*. 2004. Vol. 431 (7012). P. 1084–1087. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature02995>
15. Svalgaard L., Cliver E. W. Long-term geomagnetic indices and their use in inferring solar wind parameters in the past. *Advances in Space Research*. 2007. Vol. 40 (7). P. 1112–1120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.06.066>

## INFLUENCE OF SOLAR ACTIVITY ON THE SANITARY CONDITION OF FORESTS

**Moroz V.**

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor  
West Ukrainian National University (Ternopil, Ukraine)

e-mail: vera\_moroz@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1457-4641>

**Krynytskyy H.**

Doctor of Biological Sciences, Professor  
National Forestry University of Ukraine (Lviv, Ukraine)

e-mail: krynytsk@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-9991>

*The article presents the results of a comprehensive study on the impact of solar activity, expressed by the Wolf number, on the sanitary condition of forest ecosystems in Ukraine amid climate change and global environmental transformations. The primary aim of the study is to determine the nature of both direct and delayed relationships between the solar activity index and various categories of forest mortality, considering accompanying climatic, biotic, and anthropogenic factors. The scientific novelty lies in the application of lag analysis with a time delay of up to three years, enabling the assessment of inertial responses of forest biocenoses to changes in cosmic factors. The methodological foundation of the research involved statistical analysis of long-term data (1961–2023), including the calculation of Pearson correlation coefficients between the Wolf number, climatic parameters (temperature, precipitation, hydrothermal coefficient), CO<sub>2</sub> emissions, and categories of forest damage (insects, diseases, adverse weather conditions, fires, and other causes). The results indicate the absence of statistically significant linear relationships between the Wolf number and climatic indicators. However, strong correlations were identified with the sanitary condition of forests: notably, a significant negative correlation between the Wolf number and forest mortality caused by insects ( $r = -0.74$ ), as well as positive lag correlations with diseases ( $r = 0.79$ ) and adverse weather conditions ( $r = 0.87$ ) at approximately a two-year delay. Additionally, a moderate positive association was found between forest mortality and CO<sub>2</sub> emissions, suggesting a potential feedback effect of degradation processes on the carbon cycle. The study's findings confirm the importance of incorporating extraterrestrial (astrophysical) factors into ecological monitoring systems and adaptation planning to preserve the resilience of forest ecosystems under climate change conditions. The practical significance of the work lies in the potential use of the obtained data to enhance forest resource management, improve risk forecasting of forest mortality, and develop adaptation strategies addressing global environmental challenges.*

**Keywords:** temperature, precipitation, hydrothermal coefficient, insect pests, diseases, CO<sub>2</sub> emissions, forest mortality.

## REFERENCES

1. Smith, K. R., Woodward, A., Campbell-Lendrum, D., Chadee, D. D., Honda, Y., Liu, Q., ... Sauerborn, R. (2014). Human health: impacts, adaptation, and co-benefits. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 709–754). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved from <https://www.kirksmith.org/publications/2014/10/15/ipcc-2014-wgii-chapter-11-human-health-impacts-adaptation-and-co-benefits>
2. Tinsley, B. A. (2000). Influence of solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics in the tropo-sphere. *Space Science Reviews*, 94(1–2), 231–258. doi: 10.1023/A:1026797127105
3. Koch, H. W., & Cliver, E. W. (2006). A historical review of major solar-terrestrial relationships. *Advances in Space Research*, 37(8), 1421–1430. doi: 10.1016/j.asr.2005.02.007
4. Vyklyuk, Y., Radovanović, M. M., Stanojević, G., Petrović, M. D., Ćurčić, N. B., Milenković, M., ... Gajić, M. (2020). Connection of Solar Activities and Forest Fires in 2018: Events in the USA (California), Portugal and Greece. *Sustainability*, 12(24), 10261. doi: 10.3390/su122410261
5. Gomes, J. F. P., & Radovanovic, M. (2008). Solar activity as a possible cause of large forest fires — A case study: Analysis of the Portuguese forest fires. *Science of the Total Environment*, 394(1), 197–205. doi: 10.1051/0004-6361/201423391
6. Usoskin I. G., Hulot G., Gallet Y. Roth R., Licht A., Joos F., ... Khokhlov, A. (2014). Evidence for distinct modes of solar activity. *Astronomy & Astrophysics*, 562, L10. doi: 10.1051/0004-6361/201423391

7. Bard, E., & Frank, M. (2006). Climate change and solar variability: What's new under the sun? *Earth and Planetary Science Letters*, 248(1–2), 1–14. doi: 10.1016/j.epsl.2006.06.016
8. Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M. N., Showers, W., ... Bonani, G. (2001). Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294(5549), 2130–2136. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1065680>
9. Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P., Kurz, W., ... Ciais, P. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. doi: 10.1126/science.1201609
10. Seidl, R., Schelhaas, M. J., Rammer, W., & Verkerk, P. J. (2014). Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4(9), 806–810. doi: 10.1038/nclimate2318
11. Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M. ... Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684. doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
12. IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge Univ. Press. Retrieved from [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf)
13. IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
14. Solanki, S. K., Usoskin, I. G., Kromer, B., Schüssler, M., & Beer, J. (2004). Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, 431(7012), 1084–1087. doi: 10.1038/nature02995
15. Svalgaard, L., & Cliver, E. W. (2007). Long-term geomagnetic indices and their use in inferring solar wind parameters in the past. *Advances in Space Research*, 40(7), 1112–1120. doi: 10.1016/j.asr.2007.06.066

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**МОРОЗ Віра Василівна** — кандидат сільськогосподарських наук, доцент, директор Навчально-наукового центру сталого енергетичного розвитку та кліматичної безпеки, Західноукраїнський національний університет (вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, Україна, 46000; e-mail: vera\_moroz@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1457-4641>).

**КРИНИЦЬКИЙ Григорій Томкович** — доктор біологічних наук, професор, Національний лісо-технічний університет України (вул. Ген. Чупринки, 103, м. Львів, Україна, 79057; e-mail: krynytsk@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7020-9991>).

## Новини

### Новини

## Новини • Новини • Новини

У фінській Лапландії, за 2747 миль від Рима, науковці виявили найстаріше дерево Європи — 1647-річний ялівець, що пережив епоху Римської імперії. Дослідник Університету Падуї, лісовий еколог **Марко Каррер**, разом із командою встановили його вік за допомогою аналізу деревних кілець та сучасних технологій. Не дивлячись на скромні розміри (стовбур лише 10 см у діаметрі), ця рослина демонструє вражаючу життєздатність, що змінює уявлення про довговічність деревних видів. “Це унікальний приклад адаптації до суворих умов, який дає нові відповіді про межі виживання рослин”, — зазначила співавтор дослідження **Анджела Луїза Прендін**.