

ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ВПЛИВУ ЗМІН КЛІМАТУ НА ЛІСОВІ ЕКОСИСТЕМИ

О.Ю. Чорнобров

Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: oleksandr.chornobrov@ukr.net; ORCID: 0000-0001-8251-1573

Кліматичні спостереження доводять існування тенденції підвищення глобальної температури повітря на земній кулі, що спричинено викидами парникових газів в атмосферу. У статті проаналізовано основні екологічні впливи змін клімату на лісові екосистеми помірного кліматичного поясу, зосереджуючись на помірному континентальному біокліматичному регіоні Європи. Дослідження виконано шляхом аналізу та синтезу літературних джерел та Інтернет-ресурсів. Основними прямими впливами змін клімату на ліси є підвищення концентрації CO₂, зміни температури, кількості та режиму опадів. Непрямі впливи є результатом взаємодії між змінами кліматичних показників, абіотичними та біотичними чинниками. Прогнозоване збільшення концентрації CO₂ може стимулювати підвищення росту та продуктивності лісових насаджень. Наслідки підвищення температури в Європі відрізнятимуться залежно від біокліматичного регіону, що характеризуються відповідними лімітуючими чинниками росту і розвитку лісів. Збільшення температури спричинить зміни в ареалах видів рослин, породному складі лісів та конкуренції між деревними видами. У лісах зони помірного біокліматичного регіону потенційна нестача літніх опадів із подальшими посухами може обмежувати підвищення продуктивності лісів. В окремих регіонах екстремальні погодні умови (зокрема, тривалі посухи) будуть посилюватися та матимуть негативні наслідки на лісові екосистеми. В Україні внаслідок змін клімату відбуватиметься значне звуження зони оптимального росту за вологістю клімату для двох основних лісотвірних порід — сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) та дуба звичайного (*Quercus robur* L.). Зміни клімату можуть збільшити частоту та інтенсивність стихійних природних явищ, спричинених абіотичними чинниками (буреломи, вітровали і сніголами, пожежі в екосистемах), а також посилити вразливість лісів до них. Загалом вважається, що зміна клімату може підвищити інтенсивність спалахів шкідників та сприяти успішній колонізації грибових патогенів. Значна частина цих наслідків призведе до збільшення шкоди лісам, однак потрібно враховувати взаємодію між абіотичними чинниками. Зміна клімату є однією з найбільших поточних і майбутніх загроз біорізноманіттю лісів, оскільки вона безпосередньо впливає як на види, так і на їхні середовища існування. Вивчення екологічних впливів змін клімату є необхідним для розроблення стратегій адаптації до них та пом'якшення їхніх негативних наслідків.

Ключові слова: лісові насадження, деревні види, ареал, абіотичні та біотичні чинники, вразливість, стійкість, біорізноманіття.

ВСТУП

Вплив людської діяльності на клімат Землі посилюється і дедалі стає більш очевидним [1; 2]. Кліматичні спостереження доводять існування тенденції глобального потепління: глобальна середня температура зросла на 0,8°C з 1900 р. [1; 3; 4]. Разом з потеплінням відбувається зменшення снігового та льодового покриву, підвищується рівень моря. З 1900 по 2005 рр. спостерігалося значне збільшення кількості опадів у східній частині Північної та Південної

Америки, Північної Європи та Північної та Центральної Азії [4]. Водночас, у південній частині Африки та частково Азії кількість опадів зменшується. Посухи стали тривалішими та сильнішими в усьому світі та вразили більші території з 1970-х років, особливо в тропіках і субтропіках [4]. Нові прогнозні сценарії зміни клімату для Європи припускають, що до 2100 р. температура підвищиться приблизно від 2°C у Північно-Західній Європі до 3°C у Центральній Європі та 4–5°C у північній частині бореальної зони та Середземномор'ї [1].

Як відомо, основною причиною глобальної зміни клімату є парниковий ефект. Глобальне підвищення температури спричинено людською діяльністю, а саме викидами парникових газів, передусім діоксиду вуглецю та метану [5]. Докази з багатьох джерел свідчать про те, що зміна клімату стає дедалі серйознішою, і, зважаючи на поточні тенденції, можна очікувати, що ця тенденція до підвищення посилиться в майбутньому [2; 5]. Нині спостереженнями вже підтверджено різні зміни кліматичних умов у Європі. Збільшення середньої температури призвело до екстремальних погодних умов, безпрецедентних посух, повеней і вітровалів (буреломів), і прогнозується, що розвиток зазначених явищ і процесів посилиться [6; 7].

Нині розроблено низку моделей щодо майбутніх кліматичних змін. Важливим питанням під час розгляду заходів щодо адаптації та пом'якшення наслідків зміни клімату є невизначеність у прогнозах майбутнього клімату. Як зазначають науковці, на додаток до нинішніх невизначеностей, які виникають під час розроблення моделей, існують чинники, пов'язані з майбутніми викидами в атмосферу. Тому, діапазон прогнозу відображає невизначеність щодо майбутніх викидів, а також щодо власне кліматичних моделей [1]. Для демонстрації потенційних змін клімату було розроблено різні кліматичні сценарії. Найпоширенішими серед них є сценарії на основі Спеціального звіту про сценарії викидів (SRES) [8] та репрезентативних траєкторій концентрацій (RCP, Representative Concentration Pathways) [9].

Згідно з даними оцінювання без ефективною глобальною політикою пом'якшення наслідків змін клімату, збільшення температури становитиме від 1,8°C до 4°C до 2100 р. порівняно з 1990 р. [1]. Це набагато вище, ніж підвищення температури з доіндустріальних часів. Ці зміни відрізняються залежно від регіону та сценарію викидів. Наприклад, за сценарієм A1B, прогнозоване середньорічне потепління з 1980/1999 до 2080/2099 становить від 2,3°C до 5,3°C у Північній Європі та від 2,2°C до 5,1°C

у Південній Європі та Середземномор'ї. Всі моделі прогнозують, що найбільше підвищення температури буде у Східній Європі взимку та у Західній та Південній Європі влітку [1].

Майбутні зміни клімату також проявлятимуться у зміні режиму та кількості опадів, значно відрізнятимуться за своїм просторовим і часовим розподілом. Загалом у Європі прогнозують збільшення кількості опадів на півночі та зменшення їх на півдні [1]. З даними моделювання річна зміна середньої площі з опадами від 1980–1999 рр. до 2080–2099 рр. змінюється від 0 до 16% у Північній Європі і від –4 до –27% у Південній Європі та Середземномор'ї [10]. Найбільше зростання в Північній і Центральній Європі прогнозується взимку.

Станом на 2020 р. ліси займають 4,1 млрд га, що становить 31% загальної площі суходолу [11]. Вони виконують важливі екологічні, економічні та соціальні функції. Зокрема, лісові екосистеми відіграють важливу роль у кругообігу речовин та енергії, виконуючи важливу функцію у депонуванні вуглецю шляхом поглинання його з атмосфери у процесі фотосинтезу, зберігання в біомасі та ґрунті. Паризькою угодою (2015) підтверджено важливу роль лісів планети у запобіганні змінам клімату [12].

Мета роботи — оцінити основні екологічні впливи змін клімату на лісові екосистеми помірного континентального біокліматичного регіону Європи.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідженням впливу змін клімату на лісові екосистеми займалося низка вчених. С. Loehle у роботі [13] проаналізовано низку досліджень, заснованих на імітаційних моделях, що передбачають значні зміни породного складу, відмирання дерев або зменшення лісового покриву у відповідь на підвищення температури змін клімату. Науковці R. Ceulemans, S. Kellomäki, R.J. Norby, M.U.F. Kirschbaum зі співавт. вивчали вплив підвищення концентрації

CO₂ в атмосфері на інтенсивність фотосинтезу у деревних рослинах [14–17], Н. Sahe, S. Palmroth зі співавт. — на ріст і продуктивність лісових насаджень [18–20]. Вченими W. Thuiller, M.K. Dyderski зі співавт. змодельовано потенційні довгострокові зміни в ареалах деревних порід в умовах змін клімату [21; 22], а X. Morin та G. Van Houtven зі співавт. аналізували ймовірні зміни у породному складі деревостанів [23; 24]. Комплексне оцінювання основних впливів змін клімату на ліси Європи викладено у наукових працях [1; 7]. Огляд підходів до оцінювання впливу змін клімату на стихійні природні явища в європейських лісах подано у роботі [25], зокрема щодо реакції лісових комах на такі зміни [26; 27]. Також вивчалось питання впливу змін клімату на біорізноманіття лісових екосистем D.G. Hole [28].

В Україні дослідження впливу зміни клімату на лісові екосистеми розпочалися у 90-х роках ХХ ст. та проводилися українськими науковцями в рамках низки проєктів міжнародної співпраці з Європейським Інститутом Лісу й науковцями різних країн Європи, лісовими та кліматичними експертами зі США, Продовольчої та сільськогосподарської організації Об'єднаних Націй, Європейського, Світового банку та Всесвітнього фонду охорони природи. Серед українських науковців слід відмітити праці І.Ф. Букши та ін. [29–32], які стосуються оцінювання кліматичних впливів на вразливість лісів на основі біо-екологічних характеристик головних лісотвірних порід і за прогнозними сценаріями регіональних кліматичних моделей. С. Стойко [33] охарактеризував вплив змін клімату на лісові екосистеми Карпат. Однак, методи моделювання впливу зміни клімату на життєздатність лісових порід розроблені ще недостатньо.

Оцінювання чутливості лісової екосистеми до змін клімату здійснюється за впливом біотичних та абіотичних чинників, як на фізіологічні реакції деревних рослин, так і на екосистемні процеси загалом. Це питання є складним і потребує подальшого вивчення.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження виконано шляхом аналізу та синтезу літературних джерел та Інтернет-ресурсів. Застосовано підхід комплексного оцінювання основних чинників прямого та непрямого впливу змін клімату, а також їх взаємодії на лісові екосистеми помірного кліматичного поясу з фокусуванням на помірному континентальному біокліматичному регіоні Європи [1].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Усі впливи змін клімату на лісові екосистеми поділяються на прямі та непрямі [1]. Прямі впливи виникають внаслідок підвищення концентрації CO₂, зміни температури та кількості опадів. Непрямі — результат взаємодії між змінами кліматичних показників, абіотичними та біотичними чинниками (*рис.*).

Основними чинниками прямого та непрямого впливу змін клімату на ліси є [1; 34]:

- збільшення концентрації CO₂ в атмосфері;
- зміни температури;
- зміни в режимі та кількості опадів, поведінках, тривалості та частоти посух;
- стихійні природні явища, спричинені абіотичними чинниками (зміни у виникненні і поширенні пожеж, частоти та інтенсивності буреломів і вітровалів, сніголомів);
- стихійні природні явища, спричинені біотичними чинниками (зміни в частоті та інтенсивності спалахів чисельності шкідників та хвороб).

Як зазначають автори [13] низка досліджень, заснованих на імітаційних моделях, передбачають істотну зміну складу і структури лісів, відмирання дерев або навіть втрату лісового покриву у відповідь на підвищення температури, що пов'язано зі збільшенням концентрації вуглекислого газу в атмосфері. Водночас, не лише кліматичні чинники визначають межі ареалу поширення деревних видів за майбутніх змін клімату. На зростання деревних видів



Схема основних екологічних впливів кліматичних змін та їх взаємодії на лісові екосистеми

впливають такі чинники, як ґрунтові умови ділянки, конкуренція з іншими видами, перешкоди для поширення шкідників і патогенів. Тому у моделюванні реакції лісів на швидкі зміни клімату необхідне точніше відображення фізіологічних основ реакції деревних видів на кліматичні показники [1; 7].

Оцінювання чутливості лісової екосистеми до змін клімату аналізується за впливом різних чинників на процеси (ріст, відпад, відтворення, стихійні природні явища біотичної природи, зміна видового складу тощо) [1].

Вважається, що збільшення концентрації CO_2 в атмосфері може сприяти підвищенню інтенсивності фотосинтезу [35; 36]. Однак, швидкість росту дерев може не збільшуватися пропорційно з підвищенням швидкості фотосинтезу, оскільки інші чинники (зокрема, наявність поживних речовин) можуть стати більш важливими, обмежуючи здатність дерев збільшувати приріст, особливо в природних екосистемах [16]. Очікуваний ефект посилення росту рослин у відповідь збільшення кон-

центрації CO_2 буде обмежений температурою і опадами, що підтверджено низкою досліджень [36]. В огляді короточасних експериментів із підвищенням вмісту CO_2 (менше одного сезону) науковці виявили, що фотосинтез листяних видів був більш чутливим до підвищеного вмісту діоксиду вуглецю, ніж у хвойних дерев [14]. Однак результати тривалих досліджень (більше одного сезону) свідчать, що стимуляція фотосинтезу, посилена підвищеним вмістом CO_2 , була подібною у хвойних та листяних деревах, у межах 50–60% [16]. Більшість польових експериментів показали, що підвищений вміст CO_2 в повітрі посилює ріст молодих дерев або сіянців незалежно від умов зростання [14]. Результати нового експерименту [19] засвідчили, що в умовах підвищення концентрації CO_2 чиста первинна продуктивність дерев сосни та широколистяних порід була більшою на 38% та 52% порівняно зі звичайними умовами. Додавання азоту за підвищених концентрацій вуглекислого газу додатково збільшило продуктивність сосни на 11%. Нині науковцями було виявлено, що не тільки

молоді дерева, але й насадження старшого віку також підвищують продуктивність за збільшення діоксиду вуглецю. Науковці у статті [20] встановили, що 180-річний лісовий масив дуба звичайного у Центральній Англії підвищив продуктування деревної біомаси за дії посиленого вмісту CO_2 у повітрі. Крім того, відбулося збільшення виділення вуглецю з коріння в ґрунт, що, ймовірно, вплинуло на кругообіг поживних речовин.

Підвищення вмісту CO_2 в атмосфері спричиняє часткове закриття продихів, що зменшує втрату вологи під час транспірації [1]. Це призводить до збільшення співвідношення між надходженням вуглецю та втратою вологи, тобто підвищується ефективність використання вологи на рівні листків і всього насадження [37].

Згідно з моделюванням змін клімату у помірному континентальному біокліматичному регіоні, середньорічна температура підвищиться приблизно на $3\text{--}4^\circ\text{C}$, за винятком більш континентальних регіонів Центральної Європи та Причорномор'я, де температура може збільшитися на $4\text{--}4,5^\circ\text{C}$ [1].

Наслідки підвищення температури в Європі відрізнятимуться залежно від біокліматичного регіону, що характеризуються відповідними лімітуючими чинниками для росту і розвитку лісів [1]. Тому збільшення температури матиме різні наслідки — позитивні або негативні залежно від регіону та основного лімітуючого чинника. Більш високі температури подовжують вегетаційний період у північних широтах. Однак в інших регіонах вони мають негативний вплив, особливо якщо кількість опадів не збільшуються, як у випадку Середземноморського біокліматичного регіону [1; 7]. За даними аналітичного звіту [34], згідно з моделями зміни клімату очікується підвищення температури по всій території України, зокрема на близько $1,65^\circ\text{C}$ (Степ) та $1,74^\circ\text{C}$ (Лісостеп) для сценарію RCP 4.5 та між $2,68^\circ\text{C}$ (зона мішаних лісів) та $2,98^\circ\text{C}$ (Степ) для сценарію RCP 8.5.

Продуктивність лісів у північній частині бореального біокліматичного регіону

обмежена низькою температурою та доступністю поживних речовин. За цих умов більш висока температура повітря буде подовжувати тривалість вегетаційного періоду та підвищувати продуктивність [7]. У південній частині бореального регіону та у помірному регіоні продуктивність більше обмежена вологою, а менше температурою та поживними речовинами. Вища температура збільшує тривалість вегетаційного періоду, але підвищення продуктивності може бути обмежене наявністю вологи. Збільшення температури може призвести до зростання кількості посух, особливо в Середземноморському та помірному континентальному регіонах [7]. За даними окремих вчених підвищення лише температури було б позитивним для бореальних лісів [15] та мішаних і широколистяних лісів [18], але взаємодія з іншими чинниками все ще вивчається [1; 7].

Зміни в структурі опадів, ймовірно, матиме великий відповідний вплив на продуктивність лісів у регіонах, де продуктивність обмежена вологою [17]. Інший кліматичний сценарій моделювання підтверджує загальне збільшення зимових опадів у Північній та Центральній Європі і (у деяких районах дуже значне) зменшення літніх опадів у центральній та південній частині Європи [1]. Зростання температури без збільшення кількості опадів, або зменшення кількості опадів може призвести до посухи, особливо в Середземноморському, а також у помірному континентальному регіонах. Мінливість клімату особливо важлива у зв'язку зі зміною кількості опадів, оскільки екстремальні явища, такі як тривалі посухи та спекотні періоди, мають більш різкі наслідки для росту та виживання дерев, ніж поступові зміни помірних кліматичних умов. Автори [38] узагальнили вплив спеки та посухи на дерева на рівні рослин і виявили зменшення поглинання CO_2 та продуктування біомаси під час посухи. Зміни, спричинені посухою, особливо знижують ріст чутливих видів деревних рослин.

За даними прогнозування кліматичних змін у помірному біокліматичному регіоні

Європи очікується збільшення середньорічної кількості опадів на 10% переважно взимку, в той час як кількість літніх опадів зменшиться в кількох регіонах (до -10%) [1]. За даними аналітичного звіту [34] зміна клімату істотно не вплине на кількість опадів в Україні. За сценарієм RCP 4.5 зміна кількості опадів становитиме від 13 мм у зоні Степу до 55 мм у Лісостепу. В умовах сценарію RCP 8.5 зміна кількості опадів — понад 80 мм у зоні мішаних лісів [34].

Наслідками підвищення температури є також зміни у породному складі лісів та конкуренції між деревними видами [1; 7; 23; 24]. Науковцями змодельовані потенційні довгострокові зміни в ареалах деревних порід в умовах змін клімату [21], які прогнозують, що території з помірним кліматом втратять багатство видів і різноманіття через загибель широколистяних дерев. Тому, передбачалося, що вони мігруватимуть у бореальні ліси, збільшуючи їх видове багатство та різноманітність. Хвойні ліси за умови тривалих змін демонструють більш швидкий перехід до домінування бука та інших твердолистяних порід помірного регіону. Затримка міграції нових видів, включно з видами роду бук (*Fagus* L.), сприятиме перевазі таких видів, як береза повисла (*Betula pendula* Roth.) та дуб (*Quercus* L.) у лісах із низькою продуктивністю та різноманітністю [1].

Вчені у іншому дослідженні [22] оцінили зміни в ареалах 20 європейських лісових видів помірної зони за чотирма сценаріями зміни клімату. Сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.) і ялина звичайна (*Picea abies* (L.) H. Karst.) втратять більшу частину кліматично придатних для росту територій у помірній зоні навіть за оптимістичних сценаріїв, за винятком Західної Європи та гірських регіонів. Серед листяних видів найбільша прогнозована втрата кліматичного оптимуму для берези повислої за найгіршого сценарію. Види роду дуб і бук лісовий (*Fagus sylvatica* L.), за позитивним сценарієм, зберігатимуться в своєму кліматичному оптимумі на більшій частині свого поточного ареалу, за винятком південно-східної частини ареалу.

Згідно зі сценарієм A1B в Україні надалі відбуватиметься зсув меж природних зон у північно-західному напрямку. Згідно з оцінювання ефектів впливу зміни клімату на лісостани, проведеного в Україні групою науковців [32] у період 2080–2100 рр. відбуватиметься значне звуження зони оптимального росту за вологістю клімату для сосни звичайної та дуба звичайного. Вже у середині XXI ст. площа територій із незадовільними умовами для дуба становитиме 26% території. Наприкінці століття сприятливі для росту дуба умови (оптимальні та субоптимальні) залишаться лише на заході, на решті території сучасної зони мішано-широколистяних лісів умови для дуба будуть малозадовільними і навіть екстремальними. Для сосни — звуження зони субоптимальних умов на заході та розширення зони непридатних умов на схід і до центру [32].

Зміни клімату також впливатимуть на абіотичні стихійні природні явища з істотними наслідками для лісових екосистем [1; 25]. В Європі такими явищами є вітровали і буреломи (сніголоми), пожежі в екосистемах, повені та посухи, на кожне з яких можуть вплинути зміни клімату. У період 1950–2000 рр. середньорічно 35 млн м³ деревини було пошкоджено внаслідок стихійних природних явищ (близько 8% від загального обсягу рубок у Європі), з них частка пошкоджень від вітру становила 53%, пожежі спричинили 16% від загального обсягу [7]. В умовах зміни клімату екстремальні погодні умови та явища (посуха, повені, урагани) будуть посилюватися, вони мають прямі й непрямі впливи на ліси. Дослідження показали, що лісові пожежі матимуть значно більші наслідки, коли переважають масштабні посухи [7]. Зі змінами клімату прогнозують, що в окремих регіонах повені відбуватимуться частіше з відповідними наслідками для лісових насаджень прибережних зон.

Очікується, що внаслідок змін клімату зросте пожежна небезпека лісів по всій Європі, зокрема у бореальній зоні та центральноєвропейських регіонах.

Сильні вітри є істотним чинником у Центральній, а також у Західній і Північній Європі [1; 39] та спричиняють пошкодження в середньому 18,7 млн м³ деревини щороку [40]. Пошкодження лісу внаслідок дії вітровалів, буреломів і сніголомів є постійною причиною економічних втрат у лісовому господарстві по всій Європі [1]. Економічні збитки становлять сотні мільйонів євро щороку.

Моделі глобальної циркуляції передбачають дуже ймовірним, що більша кількість опадів випадатиме у Північній Європі, особливо взимку та навесні, зумовлюючи значне збільшення ризику повеней у Центральній та Північній Європі. Кількість дощових днів зменшиться, але кількість днів із сильними дощами зростатиме. Така зміна призводить до більшої кількості літніх посух, а також до більш екстремальних повеней влітку [1]. Повінь є більш шкідливою, якщо вона відбувається під час періоду вегетації, ніж у період спокою рослин. Дереву найбільш вразливі до наслідків затоплення пізньої весни, відразу після першого інтенсивного росту [41].

Основні чинники змін клімату (підвищення концентрації CO₂ в атмосфері, зміни температури, опадів та стихійних явищ абіотичної природи) істотно впливають на біотичні чинники, зокрема на рослиноідні організми та патогени, прямо чи опосередковано шляхом змін у живленні рослин та їх стійкості або взаємодії між угрупованнями [1; 25]. Зміна клімату впливатиме на часову та просторову динаміку (потенційних) видів шкідників, впливаючи на частоту й наслідки спалахів їх чисельності, а також на їх просторовий розподіл та географічний ареал. Загалом вважається, що зміна клімату вплине на кількість спалахів шкідників та успішну колонізацію грибок-вих патогенів [7; 25].

Кліматичні зміни матимуть значний вплив на поширення живих організмів, оскільки, розмір та розташування ареалів видів залежить від взаємодії доступних середовищ існування з відповідним кліматом [1]. Ймовірним є також вплив на фенологічну синхронність між рослиноідними

організмами та відповідними рослинами. Зміни в кількості опадів та вологості впливатимуть на утворення спор та інфікування патогенами. Водночас, як зазначають вчені, складні взаємодії між температурою, опадами, доступністю поживних речовин, якістю рослин, продуктивністю комах та розширенням ареалу поширення ускладнюють прогнозування майбутніх проблем зі шкідниками лісу.

Науковці [27] провели аналіз літературних джерел на цю тему і встановили, що основними ідентифікованими механізмами позитивної реакції лісових комах на зміну клімату є більша кількість поколінь на рік і вища виживаність за високих температур, нижча стійкість дерев до нападу комах під час сильніших посух, більша кількість субстрату для розмноження короїдів після вітровалів та буреломів та зміни якості субстрату для дефоліаторів через підвищений вміст CO₂. Більшість цих наслідків призведуть до зростання шкоди лісам, однак деякі кліматичні процеси матимуть негативні наслідки для комах також (зокрема, хвилі спеки можуть посилити смертність). Водночас, вчені зазначають, що чинники зміни клімату, ймовірно, взаємодіють між собою — протидіють, що призводить до процесу анігіляції, або в результаті виникають синергетичні ефекти. Це потрібно враховувати під час прогнозування впливу змін клімату на біотичні чинники у лісових насадженнях [27]. Недавні дослідження також показали, що взаємодія між комахами та деревами відбувається через мікоризні та ендоефітні гриби [42; 43] або бактерії. Питання, як ці мікроорганізми реагують на зміну клімату і чи впливає їхня реакція на резистентність дерева-господаря до хвое- та листогризухих комах, залишається відкритим [27].

Зміна клімату є однією з найбільших поточних і майбутніх загроз біорізноманіттю лісів. Вона безпосередньо діє як на види, так і на їхні середовища існування [44]. Подальші зміни клімату можуть мати значний вплив на місцеве та регіональне біорізноманіття та зусилля щодо його збереження. Абіотичні умови місцевості та придатність

середовищ існування для певних видів будуть змінюватися, тому прогножуються або вже нині спостерігаються зміни в ареалах певних видів. Зміна клімату сприяє видам із певними ознаками, тоді як чисельність інших видів може зменшитися або навіть вимерти, принаймні локально [26]. Водночас, може підвищитись ризик вимирання видів там, де відповідне середовище існування відсутнє або недоступне [45]. Крім того, може збільшитись небезпека появи інвазійних видів [7]. Оскільки шкідники та хвороби дерев також можуть отримувати користь від зміни клімату, наприклад, через підвищення зимової температури або тривалі вегетаційні періоди, вплив на види дерев посиляться, що може призвести до трансформації основних типів лісів [28]. Зрештою, зміна клімату також спричинить зміни у складі та функціональних характеристиках угруповань.

У глобальному масштабі очікується, що збереження біорізноманіття лісів стане ще складнішим у світлі зміни клімату та пов'язаних із нею невизначеностей. Реакції видів флори і фауни на зростання температури та посухи залежать від регіональних особливостей змін клімату. У помірному континентальному біокліматичному регіоні вони можуть мати наслідки на рівні екосистеми та угруповання, що проявлятимуться у зменшенні біорізноманіття.

ВИСНОВКИ

Дослідження вказують на регіональну мінливість майбутніх змін клімату в Європі. Основні впливи кліматичних змін призведуть до змін в ареалах лісотвірних видів, структурі і складі лісових насаджень, впливатимуть на їх ріст та продуктивність, інтенсивність та частоту стихійних природних явищ.

Вплив змін клімату на окремі деревні види може бути як позитивним, так і негативним, залежно від регіональних особливостей та умов території. Ліси в помірному континентальному біокліматичному регіоні здатні реагувати на прогнозовані зміни клімату збільшенням поглинання вуглецю, особливо в північних частинах регіону. Однак у короткостроковій перспективі вони можуть бути джерелом, а не поглиначем атмосферного вуглецю, оскільки розподіл вуглецю між компонентами екосистеми змінюється у відповідь на зміну кліматичних умов.

В Україні на територіях з майбутніми несприятливими кліматичними умовами прогнозується істотне зменшення продуктивності лісотвірних видів, поступове зниження здатності до природного поновлення, порушення циклу сезонного розвитку, зменшення стійкості до шкідників і патогенів.

ЛІТЕРАТУРА

- Linder, M., Garcia-Gonzalo, J., Kolström, M., Green, T., & Reguera, R. (2008). Impacts of Climate Change on European Forests and Options for Adaptation. Report to the European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development. 173 p. URL: https://adaptecca.es/sites/default/files/documentos/impact_of_climate_change_on_european_forest_and_options_for_adaptation.pdf.
- Zdeněk, V., Stanislav, V., & Cukor, J. (2023). European forests under global climate change: Review of tree growth processes, crises and management strategies. *Journal of Environmental Management*, 332, 117353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117353>.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., & Lo, K. (2006). GISS Surface Temperature Analysis. Global Temperature Trends: 2005 Summation. NASA Goddard Institute for Space Studies and Columbia University Earth Institute, New York, NY 10025, USA.
- Moore, B., & Allard, G. (2008). Climate change impacts on forest health. Working Paper FBS/34E. FAO. URL: <https://www.fao.org/forestry-fao/15905-0dc804ee7d97e656f06507bdcecdcc721.pdf>.
- Lee, H., & Romero, J. (Eds.). (2023). IPCC In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 35–115). IPCC, Geneva, Switzerland. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.
- Meehl, G., & Tebaldi, C. (2004). More Intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305, 994–997. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1098704>.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., ... Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems.

- Forest Ecology and Management*, 259(4), 698–709. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>.
8. Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., ... Dadi, Z. (2000). *Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
 9. Pachauri, R. K., & Meyer, L. (Eds.). (2014). IPCC. In: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
 10. Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioac, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., ... Whetton, P. (2007). Regional Climate Projections. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, ... H. L. Miller (Eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 847–940). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 11. *The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies*. (2022). Rome, FAO. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb9360en>.
 12. Паризька угода. Ратифіковано Законом № 1469-VIII від 14.07.2016. (2016). (Україна). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text.
 13. Loehle, C., & LeBlanc, D. (1996). Model-based assessments of climate change effects on forests. A critical review Netherlands: N. p. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(96\)83709-4](https://doi.org/10.1016/0304-3800(96)83709-4).
 14. Ceulemans, R., & Mousseau, M. (1994). Tansley review No. 71. Effects of elevated atmospheric CO₂ on woody plants. *New Phytologist*, 127, 425–446.
 15. Kellomäki, S., & Wang, K.-I. (1996). Photosynthetic responses to needle water potentials in Scots pine after a four-year exposure to elevated CO₂ and temperature. *Tree Physiology*, 16(9), 765–772. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/16.9.765>.
 16. Norby, R. J., Wullschlegel, S. D., Gunderson, C. A., Johnson, D. W., & Ceulemans, R. (1999). Tree responses to rising CO₂ in field experiments: implications for the future forest. *Plant, Cell & Environment*, 22, 683–714. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00391.x>.
 17. Kirschbaum, M. U. F. (2004). Direct and Indirect Climate Change Effects on Photosynthesis and Transpiration. *Plant Biology*, 6, 242–253. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-2004-820883>.
 18. Saxe, H., Cannell, M. G. R., Johnsen, Ø., Ryan, M. G., & Vourlitis, G. (2001). Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist*, 149, 369–399. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00057.x>.
 19. Palmroth, S., Kim, D., Maier, C. A., Medvigy, D., Walker, A. P., & Oren, R. (2024). Increased leaf area index and efficiency drive enhanced production under elevated atmospheric [CO₂] in a pine-dominated stand showing no progressive nitrogen limitation. *Global Change Biology*, 30, e17190. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17190>.
 20. Norby, R. J., Loader, N. J., Mayoral, C., Ullah, S., Curioni, G., Smith, A. R., ... MacKenzie, A. R. (2024). Enhanced woody biomass production in a mature temperate forest under elevated CO₂. *Nat. Clim. Chang.*, 14, 983–988. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02090-3>.
 21. Thuiller, W., Lavorel, S., Sykes, M. T., & Araújo, M. B. (2006). Using niche-based modelling to assess the impact of climate change on tree functional diversity in Europe. *Diversity and Distributions*, 12, 49–60. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2006.00216.x>.
 22. Dyderski, M. K., Paż-Dyderska, S., Jagodziński, A. M., & Puchałka, R. (2025). Shifts in native tree species distributions in Europe under climate change. *Journal of Environmental Management*, 373, 123504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123504>.
 23. Morin, X., Fahse, L., Jactel, H., Scherer-Lorenzen, M., García-Valdés, R., & Bugmann, H. (2018). Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8, 5627. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>.
 24. Van Houtven, G., Phelan, J., Clark, C., Sabo, R. D., Buckley, J., Thomas, R. Q., ... LeDuc, S. D. (2019). Nitrogen deposition and climate change effects on tree species composition and ecosystem services for a forest cohort. *Ecological Monographs*, 89(2), e01345. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecm.1345>.
 25. Romeiro, J. M. N., Eid, T., Antón-Fernández, C., Kangas, A., & Trømborg, E. (2022). Natural disturbances risks in European Boreal and Temperate forests and their links to climate change — A review of modelling approaches. *Forest Ecology and Management*, 509, 120071. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120071>.
 26. Bässler, C., Hothorn, T., Brandl, R., & Müller, J. (2013). Insects overshoot the expected upslope shift caused by climate warming. *Plos One*, 8(6), e65842. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065842>.
 27. Jactel, H., Koricheva, J., & Castagneyrol, B. (2019). Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35, 103–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.010>.
 28. Hole, D. G., Willis, S. G., Pain, D. J., Lincoln, D. F., Butchart, S. H. M., Collingham, Y. C., Rahbek, C., & Huntley, B. (2009). Projected impacts of climate change on a continent-wide protected area network. *Ecology Letters*, 12(5), 420–431. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01297.x>.
 29. Букша, І. Ф., Гожик, П. Ф., & Смельянова, Ж. Л. (1998). *Україна та глобальний парниковий ефект. Кн. 2. Вразливість і адаптація екологічних та економічних систем до зміни клімату: моногр.* Київ: вид-во Агентства з раціонального використання енергії та екології.
 30. Букша, І., Пивовар, Т., & Букша, М. (2014). Оцінка вразливості лісів східної України до зміни клі-

- мату з використанням ГІС-технологій. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, (12), 30–37. URL: <http://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/131>.
31. Букша, І. Ф., Швиденко, А. З., Бондарук, М. А., Целішев, О. Г., Пивовар, Т. С., Букша, М. І., ... Краковська, С. В. (2017). Методологія моделювання та оцінювання впливу зміни клімату на лісові фітоценози України. *Науковий вісник НУБіП. Сер.: Лісівництво і декоративне садівництво*, 266, 26–38.
 32. Букша, І. Ф., Бондарук, М. А., Целішев, О. Г., Пивовар, Т. С., Букша, М. І., & Пастернак, В. П. (2017). Прогноз життєздатності сосни звичайної і дуба звичайного при зміні клімату в рівнинній частині України. *Лісівництво і агролісомеліорація*, 130, 146–158.
 33. Стойко, С. (2011). Вплив глобальної зміни клімату на лісові формації Карпат. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, (9), 21–29. URL: <http://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/360>.
 34. Іванюта, С. П. (Ред.), Коломієць, О. О., Малиновська, О. А., & Якушенко, Л. М. (2020). *Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь*. Київ: НІСД. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2020-10/dop-climate-final-5_sait.pdf.
 35. Koch, G. W., & Mooney, H. A. (1996). Response of terrestrial ecosystems to elevated CO₂: A synthesis and a summary. In: G. W. Koch & H. A. Mooney (Eds.), *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems* (pp. 415–429). Academic Press, San Diego.
 36. Beedlow, P. A., Tingey, D. T., Phillips, D. L., Hogsett, W. E. & Olszyk, D. M. (2004). Rising atmospheric CO₂ and carbon sequestration in forests. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2, 315–322. DOI: [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2004\)002\[0315:RACACS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2004)002[0315:RACACS]2.0.CO;2).
 37. Field, C. B., Jackson, R. B., & Mooney, H. A. (1995). Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plants to the global scale. *Plant, Cell and Environment* 18, 1214–1225.
 38. Granier, A., Reichstein, M., Bréda, N., Janssens, I. A., Falge, E., Ciais, P., ... Wang, Q. (2007). Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143 (1–2), 123–145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.004>.
 39. Forzieri, G., Pecchi, M., Girardello, M., Mauri, A., Klaus, M., Nikolov, M., ... Beck, P. S. A. (2020). A spatially explicit database of wind disturbances in European forests over the period 2000–2018. *Earth System Scientific Data*, 12, 257–276. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-12-257-2020>.
 40. Romagnoli, F., Cadei, A., Costa, M., Marangon, D., Pellegrini, G., Nardi, D., ... Rafaele, C. (2023). Windstorm impacts on European forest-related systems: An interdisciplinary perspective. *Forest Ecology and Management*, 541, 121048. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121048>.
 41. Glenz, C., Schlaepfer, R., Iorgulescu, I., & Kienast, F. (2006). Flooding tolerance of Central European tree and shrub species. *Forest Ecology and Management*, 235(1–3), 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.065>.
 42. Fernandez-Conradi, P., Jactel, H., Robin, C., Tack, A. J. M., & Castagneyrol, B. (2018). Fungi reduce preference and performance of insect herbivores on challenged plants. *Ecology*, 99(2), 300–311. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecy.2044>.
 43. Gange, A. C., Koricheva, J., Currie, A. F., Jaber, L. R., & Vidal, S. (2019). Meta-analysis of the role of entomopathogenic and unspecialized fungal endophytes as plant bodyguards. *New Phytologist*, 223, 2002–2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.15859>.
 44. Pötzelsberger, E., Bauhus, J., Muys, B., Wunder, S., Bozzano, M., Farsakoglou, A.-M., ... Lapin, K. (2021). *Forest biodiversity in the spotlight*. European Forest Institute. URL: <https://efi.int/forestbiodiversity/factors>.
 45. Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 37, 637–669. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>.

Стаття надійшла до редакції журналу 06.10.2025