



<https://doi.org/10.33220/1026-3365.145.2024.134>

ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ ЗБУДНИКІВ ХВОРОБ І ШКІДНИКІВ НА ПІДСТАВІ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

В. М. Хрик^{1*}, О. С. Ситник², І. В. Кімейчук³, Т. П. Лозінська⁴, В. П. Масальський⁵

Досліджено проблему зменшення площі лісів унаслідок змін кліматичних умов, що призводить до низки взаємопов'язаних екологічних проблем. Виявлено, що останні кілька десятиліть характеризуються стрімким підвищенням температури та зниженням вологості повітря в багатьох регіонах світу, що дало поштовх до зміни поширення хвороботворних організмів та їхніх переносників. З'ясовано, що значно почастишали випадки появи нових інвазій. Проаналізовано основні тенденції поширення та розвитку патогенних організмів у нових для них географічних умовах. Виявлено закономірності, які дають можливість прогнозувати зміни у видовому складі патогенів, їхніх переносників та лісових екосистем загалом. Виявлено, що почастишали грибкові захворювання деревних рослин і випадки комбінованих бактеріально-вірусних інфекцій лісу в умовах зміни температурного режиму окремих територій. Проаналізовано видовий склад хвороботворних мікроорганізмів та їхніх господарів у змінених кліматичних умовах європейських країн, зокрема України. Зібрано інформацію про сучасні заходи щодо запобігання поширенню інфекцій лісу, про основні програми, які дають можливість локалізувати вплив патогенних організмів на лісові екосистеми.

Ключові слова: патогенні організми, лісові екосистеми, температурний режим, міжнародна співпраця.

Вступ. Однією з найболючіших проблем сьогодення є зменшення площі лісів. Цей процес відбувається на більшості територій планети (FAO, 2022). Причинами цього називають зміну кліматичних умов, антропогенну діяльність, циклічні метеорологічні явища тощо. Більшість учених схиляються до думки, що основною причиною зменшення площі лісів все ж є кліматичні зміни (Buksha, 2009; Jung, 2009; Buksha *et al.*, 2017; Shvydenko *et al.*, 2018; Tykhomuova and Sorkina, 2022). Зазначені зміни зумовлюються як циклічними явищами, так і діяльністю людини. Антропогенний вплив водночас підсилює дію природних чинників, які призводять до підвищення середньорічної температури повітря. Вплив різних видів господарювання полягає у виділенні понаднормової кількості парникових газів, що призводить до парникового ефекту і, відповідно, до загального підвищення середньорічної температури на планеті. Через зміну температури повітря у різних регіонах відбуваються істотні зміни в природних екосистемах. Вони передусім стосуються видового складу біоценозів. Зі зміною співвідношення абіотичних чинників змінюються також поширення та видовий склад шкідників і патогенних мікроорганізмів у ценозах (Meshkova, 2022). Найбільш помітним це є у лісових екосистемах, оскільки вони є полікомпонентними, тобто містять у складі кілька біоценозів, які характеризуються власним мікрокліматом. У зв'язку із впливом зазначених чинників підсилюються процеси інвазії патогенних організмів та їхніх переносників, що також становить істотну проблему, яку необхідно розв'язати (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2020).

¹ Хрик Василь Михайлович, доктор педагогічних наук, професор, Білоцерківський національний аграрний університет, Соборна площа, 8/1, Біла Церква, 09117, Київська область, Україна. E-mail: hvm2020@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1912-3476>

² Ситник Олександр Сергійович, кандидат сільськогосподарських наук, Білоцерківський національний аграрний університет, Соборна площа, 8/1, Біла Церква, 09117, Київська область, Україна. E-mail: sytnykoleksandr24@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2637-1849>

³ Кімейчук Іван Васильович, Білоцерківський національний аграрний університет, Соборна площа, 8/1, Біла Церква, 09117, Київська область, Україна. E-mail: ivan.kimeichuk@btsau.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9100-1206>

⁴ Лозінська Тетяна Павлівна, кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Білоцерківський національний аграрний університет, Соборна площа, 8/1, Біла Церква, 09117, Київська область, Україна. E-mail: lozinskata@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7119-0759>

⁵ Масальський Владислав Петрович, кандидат біологічних наук, доцент, Білоцерківський національний аграрний університет, Соборна площа, 8/1, Біла Церква, 09117, Київська область, Україна. E-mail: vlad.masalskiy71@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8001-2631>

* Адреса для кореспонденції: hvm2020@ukr.net

Мета роботи – проаналізувати наявність і поширення деяких патогенних організмів у лісових екосистемах європейського континенту в умовах кліматичних змін.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

1. Проаналізувати літературні джерела, у яких розглянуто проблему поширення шкідливих організмів лісу під впливом метеорологічних чинників, що дасть змогу ширше зрозуміти проблему та стимулювати пошук її оптимального вирішення.

2. Виявити основні закономірності поширення шкідливих видів у лісі внаслідок підвищення температури повітря та зміни його вологості, що забезпечить вчених інформацією про видовий склад шкідливих організмів та їхню пристосованість до нових умов довкілля.

3. З'ясувати основні шляхи прогнозування впливу згаданих чинників на лісові екосистеми, що допоможе врегулювати проблему інвазій та контролювати можливі спалахи шкідливих організмів у лісових екосистемах.

Матеріали й методи. Під час дослідження використовували методи узагальнення та систематизації інформації, отриманої з літературних джерел. Загалом проаналізовано 130 джерел, серед яких 48 використано для написання огляду.

Результати. Лісистість України становить 16,5 %, що є нижчим за середній показник для країн Європи. За площею лісів Україна посідає восьме місце в Європі (State Forest Resources Agency of Ukraine, 2024). Площа лісів у нашій країні швидко зменшується під впливом природних і антропогенних чинників. На знелісених ділянках змінюється мезоклімат, що впливає на клімат навколишньої території.

За останні 30 років середня літня температура повітря в Україні підвищилася на 1,3 °С, середня зимова – на 0,9 °С, середня весняна – на 0,9 °С, а середня осіння – на 0,4 °С (Reshetchenko *et al.*, 2022). Найбільшою мірою середня температура повітря збільшилась у січні (на 2,3 °С) та липні (на 1,4 °С). Влітку підвищилася максимальна температура, тобто стало спекотніше, а взимку – тепліше (Palamarchuk *et al.*, 2010; Orlovsky *et al.*, 2017; Reshetchenko *et al.*, 2022).

У міру підвищення середньої глобальної температури екстремально високі температури стануть частішими, а екстремально низькі – рідшими. Хвилі тепла будуть тривалішими та частішими. Як наслідок, посиляться посухи, зміниться водність річок та озер, з'являться нехарактерні для регіону екстремальні погодні явища (Singh *et al.*, 2023).

Така ж ситуація наявна і в країнах Європи. Влітку 2022 р. великі хвилі тепла охопили частини Центральної, Південної та Західної Європи, спричинивши лісові пожежі, евакуацію людей і численні смертельні випадки (*Climate change explained*, 2023).

Клімат завжди формував ліси світу (Bhatti *et al.*, 2008), але наразі він став теплішим повсюдно й надалі буде змінюватися з безпрецедентною швидкістю. Протягом наступних двох десятиліть за різними сценаріями прогнозується підвищення температури повітря, приблизно на 0–2 °С за десятиліття. Оскільки реакції на збагачення CO₂ можуть варіювати залежно від виду рослин і регіону, слід очікувати широкий спектр реакцій на підвищення рівня CO₂ в атмосфері в усьому світі (Kurz *et al.*, 2008).

Підвищення температури повітря та зміна кількості опадів мають найбільший негативний вплив, що призводить до змін термінів і тривалості вегетаційного періоду й видового складу лісових екосистем. Важливим чинником, що впливає на погодні умови вегетаційного періоду, є розподіл кількості опадів. Останніми роками відбувається значне збільшення кількості опадів у осінньо-зимовий період. У майбутньому така тенденція може призвести до значного зменшення кількості опадів у весняно-літній період та незначного збільшення на початку вегетаційного періоду (*Climate change explained*, 2023).

За даними наукових досліджень, оптимальна температура для фотосинтезу в листяних і хвойних екосистемах становить 17,5 і 16,0 °С відповідно. Опади впливають на інтенсивність фотосинтезу тільки при низьких значеннях (менше ніж 60 мм), тому зміни кліматичних параметрів на початку вегетаційного періоду можуть сприятливо впливати на фотосинтез у насадженнях (Buksha *et al.*, 2017; Budnik *et al.*, 2023).

Також варто зазначити, що зменшення кількості опадів у серпні та вересні може бути згубним для фотосинтезу та розвитку фотосинтетично активної флори. Підвищення температури може також призвести до поширення хвороб у лісових екосистемах (Budnik *et al.*, 2023).

Основною причиною інфекційних захворювань дерев є патогенні організми. Серед збудників хвороб та шкідників рослин налічується понад 600 вірусів та віроїдів, близько 250 видів мікоплазм, бактерій, включаючи рикетсії та актиноміцети, понад 20 тисяч видів грибів і кілька тисяч видів комах. Приблизно 2 % усіх відомих захворювань рослин спричинюють бактерії. Збудниками бактеріозів рослин є різні групи бактерій, які поширені в природі (Shalovylo *et al.*, 2011). Зокрема в Україні *Pseudomonas quercus* Li *et al.* спричинює рак дуба (Orlovsky *et al.*, 2017; Tsvigun *et al.*, 2022). Серед вірусів, що уражують рослини лісових екосистем, відзначають карлавірус, іларвірус тощо. Карлавіруси часто приховано уражують рослини, такі як дикий хміль, ліщина та береза. Зазвичай карлавіруси уражують деревні рослини разом з іларвірусом, ізометричним патогеном розміром близько 32 нм, який поширюється на плодово-ягідних культурах. Отже, лісові екосистеми все частіше зазнають значних уражень складними змішаними інфекціями, що спричиняють епіфітотії бактеріальної та вірусної природи. При цьому вплив клімату на поширення хвороб здійснюється через дію на комах-переносників (Tsvygun *et al.*, 2022).

У разі зміни кліматичних умов на вологіші та тепліші більшого поширення здобудуть ураження листя, наприклад, іржа (збудниками є такі гриби, як *Gymnosporangium tremelloides* Hartig., *Puccinia recondita* Rob. ex Desm f. sp. *tritici* та інші). Згідно з довготерміновими прогнозами, зміни метеочинників призведуть також до інтенсифікації поширення видів фітофтори. Одним із найчисленніших видів фітофтори наразі є ґрунтова *Phytophthora cinnamomi* Rands, яка має найбільший патогенний вплив на лісові рослини. Цей збудник присутній в районах з помірним і субтропічним кліматом, він викликає захворювання більш ніж у 1 000 видів рослин (Jung, 2009). Зараження *P. cinnamomi* та деякими іншими спорідненими видами спричинює кореневу гниль та часто призводить до загибелі рослин. Зміни кліматичних умов за останні 60 років, тобто збільшення середньої зимової температури, зміщення сезонності опадів та підвищення їхньої інтенсивності, призвели до посилення інфікування рослин декількома видами фітофтори в країнах Центральної Європи (Jung, 2009).

Передбачається, що підвищення температури призведе до збільшення потенційного діапазону експансії *P. cinnamomi* вздовж західного узбережжя Європи від однієї до кількох сотень кілометрів на схід від Атлантичного узбережжя протягом одного століття. За прогнозами протягом кількох наступних десятиліть очікується збільшення поширення захворювання дерев на кореневу гниль у помірних широтах північної і південної півкулі та зниження темпів захворюваності рослин у тропіках і субтропіках (Frankel *et al.*, 2011). Така тенденція зберігається і на цей час (Serrano *et al.*, 2022).

У помірних широтах швидко поширюється така хвороба деревних рослин, як дотістромоз, яку викликають гриби-збудники *Dothistroma septosporum* (Dorogin) M. Morelet і *Dothistroma pini* Hulbary. Інтенсифікація поширення цього грибного захворювання може бути пов'язана як із потеплінням та зміною умов вологості, так і з інтенсивним господарюванням у східних і південних регіонах України (Buksha, 2009; Meshkova *et al.*, 2014).

Відомо також, що все більшого поширення у світі набувають збудники хвороб деревних рослин, на які зміни клімату впливають опосередковано. Відбувається зараження основного здорового живителя, де патоген перебуває в латентному стані до впливу стресового чинника. Наприклад, під впливом високих температур і посухи набуває поширення коренева гниль, яку спричинюють гриби *Armillaria* sp. (Lech *et al.*, 2023). За таких погодних умов цей тип кореневої гнилі поширюється дуже швидко, уражуючи ліс на великій площі. Здебільшого в Європі потерпають хвойні ліси, а в Україні це захворювання можна побачити і в листяних лісах (Ustskyi *et al.*, 2024). Отже, зазвичай спалахи цієї інфекції виникають за зниження імунітету рослин певного ценозу під дією як абіотичних, так і біотичних стресорів.

Кліматичні зміни та антропогенна діяльність створюють передумови для зменшення біорізноманіття лісових екосистем, що водночас сприяє посиленню впливу так званих чужоземних (адвентивних) видів, тобто видів організмів, які не є властивими певній місцевості, але поширилися за межі природних ареалів унаслідок діяльності людини (Meshkova, 2022a; 2022b). Комплекси видів природних екосистем є результатом тривалої адаптації до дії екологічних чинників. Чим вищим є біорізноманіття, тим стійкішими є екосистеми до проникнення нових видів. Одним із негативних наслідків вторгнення адвентивних видів у нові регіони є пряма конкуренція з місцевими видами, зокрема за поживні ресурси (Tokarieva *et al.*, 2022). Адвентивні види можуть переносити патогени чи паразитів під час свого переміщення до нових регіонів або самі бути патогенами чи паразитами. Якщо місцеві види виявляються сприйнятливими до нових патогенів або паразитів, виникає загроза епіфітотії (Shvydenko *et al.*, 2018; Velasquez *et al.*, 2018).

Як уже зазначалося, останнім часом у лісових екосистемах ослаблення дерев спричиняють як патогени, так і шкідники, зокрема комахи. В Україні серед адвентивних видів лісових комах переважають мінери, роль яких стає значнішою, як порівняти з хвоєлистогризами (Meshkova *et al.*, 2014; Lahlali *et al.*, 2024). Це зумовлено їхньою адаптацією до високого рівня техногенного забруднення, дефіциту вологи, дії інсектицидів, а також здатністю давати кілька поколінь на рік.

Серед інвазійних молей-мінерів (*Lepidoptera: Gracillariidae*) листя гіркокаштана звичайного (*Aesculus hippocastanum* L.: Hippocastanaceae) пошкоджує каштановий мінер (*Cameraria ohridella* Deschka et Dimić, 1986), липи дрібнолистої (*Tilia cordata* Mill.: Tiliaceae) – японська липова міль-строкатка (*Phyllonorycter issikii* Kumata, 1963), білої акації (*Robinia pseudoacacia* L.: Fabaceae) – білоакацієва міль-строкатка (*Parectopa robinella* Clemens, 1863) та білоакацієвий мінер (*Macrosaccus robinella* Clemens, 1859), платана східного (*Platanus orientalis* L.: Platanaceae) – платанова міль-строкатка (*Phyllonorycter platani* Meschkow) (Antyukhova and Meshkova, 2011; Meshkova *et al.*, 2014).

До другої групи комах, які успішно поширюються, входять види із сисним ротовим апаратом, зокрема клопи й попелиці. Серед видів, присутність яких доведено в насадженнях сосни (*Pinus* sp.) у різних областях України, є насінний клоп-крайовик *Leptoglossus occidentalis* Heidemann.

Одним з найбільш поширених інвазійних видів комах-шкідників є білий американський метелик *Hyrphantria cunea* (Drury, 1773). На території України цей вид поширений переважно в південних областях, але з потеплінням клімату очікується збільшення його чисельності також на півночі країни (Matsiakh and Kramarets, 2020). Прогнозують збільшення інтенсивності поширення цього виду у східній та південній Європі (Nie *et al.*, 2023) через зміни природних умов.

Останніми роками значну небезпеку становить подальше поширення та збільшення чисельності низки комах: *Aproceros leucopoda* Takeuchi, 1939, *Corythucha arcuata* (Say, 1832), *Metcalfa pruinosa* (Say, 1830). Клоп дубовий мереживний *Corythucha arcuata* в останні кілька десятиліть суттєво поширився в південній Європі (зокрема в Італії), а в Україні він уражує деревостани південних областей (наприклад Херсонщини). У разі подальшого потепління клімату є загроза його поширення в північніші регіони. Цикадка біла *Metcalfa pruinosa* також поширюється північніше, ніж у попередні роки. В Україні її основні осередки виявлено на Одещині та Закарпатті, у Європейських країнах – в Італії, Іспанії. Очікують подальшої експансії цього виду (Matsiakh and Kramarets, 2020). Ясенова смарагдова вузькотіла златка *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 (Coleoptera: Buprestidae) проникла в Україну у 2019 р. і вже поширилася від Луганської до Харківської й Київської областей. Прогнозовано подальше поширення цього шкідника у зв'язку з кліматичними чинниками (Meshkova *et al.*, 2023), лісорослинними умовами, складом і структурою насаджень (Meshkova *et al.*, 2024).

Серед нових хвороб лісових порід найбільшу увагу вчених і практиків Європи привертає відмирання ясена (*Fraxinus* sp.) (Kowalski, 2007). Наразі встановлено, що причиною всихання

Fraxinus excelsior в Європі є поширення патогенного гриба *Hymenoscyphus fraxineus* (T. Kowalski) Baral, Queloz & Hosoya 2014. Основні симптоми хвороби включають поступове відмирання крон, некротичні плями на корі пагонів, знебарвлення деревини та листя, некрози листя, передчасне опадання листя та некрози стовбура (Davudenko and Meshkova, 2017). Інше захворювання ясена звичайного (туберкульоз) спричиняють фітопатогенні бактерії (*Pseudomonas syringae* pv. *savastanoi* (Smith 1908) Young *et al.*, 1978) (Hordiienko *et al.*, 1996; Kirisits *et al.*, 2010; Goychuk *et al.*, 2021).

Обговорення. В останні десятиліття найбільшого поширення в країнах європейського континенту набувають захворювання лісових рослин, спричинені грибами, а також комплексні бактеріально-вірусні інфекції. Це відбувається через зміну температурних умов та вологості середовищ існування, а також унаслідок поширення переносників таких хвороб на більші відстані та завоювання ними нових ареалів.

Унаслідок впливу інфекцій нового типу ослаблення лісових екосистем набуває глобального масштабу, тому необхідно розширювати дію європейських програм запобігання поширенню хвороб рослин та створювати нові, які б узгоджувались із законодавством всіх країн-учасниць (Bulman *et al.*, 2016; Macpherson *et al.*, 2018; Kleczkowski *et al.*, 2019; Roberts *et al.*, 2020; Riseh *et al.*, 2024).

Подібні програми рекомендують кілька етапів менеджменту: моніторинг, прогнозування, планування та розроблення стратегій. Зазвичай, обираючи стратегію, збирають інформацію про географічну зону, де знаходяться ці ліси, стан наукової галузі та наявність професіоналів, які мають необхідні знання та володіють інструментами для використання, фінансові та людські можливості тощо. Також визначають місця розведення та висаджування дерев, стійких до нових для регіону інфекцій.

Моніторинг є однією з найважливіших частин згаданих програм, оскільки він дає змогу зібрати максимум інформації про стан лісових екосистем, економічні та людські ресурси тощо. Надійність даних моніторингу буде максимальною, якщо систематичні обстеження стану дерев, смертності та росту, як дистанційні, так і наземні, проводитимуть кваліфіковані працівники, бажано на рівні ділянки, вододілу та ландшафту, із регулярними інтервалами. Для виявлення тенденцій росту та стану окремих видів дерев, у поширенні збудників хвороб та інших шкідливих організмів можливо використовувати ділянки інвентаризації лісів. Ефективність заходів з управління лісами може бути підвищено також із урахуванням поширення пожеж (Beukema *et al.*, 2007).

Застосування моделей викликає певні труднощі, серед яких: часто високий ступінь невизначеності вхідних даних (наприклад дані щодо поширення хвороб у лісі); нелінійні взаємозв'язки між кліматичними змінними та епідеміологічними реакціями (може бути недостатньо даних для чітких прогнозів); часте ігнорування потенціалу генетичної адаптації як рослин, так і патогенів (Frankel *et al.*, 2011).

В Україні подібні програми також існують. Вони є державними та такими, які розробляють у співробітництві з Європейськими країнами (наприклад, проєкт Forest Recovery, програма «Масштабне заліснення України», Система лісопатологічного моніторингу тощо) (Tukhomyrova and Sorkina, 2022; Utskyi *et al.*, 2024).

Як уже зазначено вище, потепління клімату змінить оптимальні екологічні показники для лісових екосистем. Так, збільшення літніх екстремальних температур несе загрозу зникнення окремих видів та появи нових (зокрема інвазійних) видів, що вплине на видовий склад та площу лісів. Ареали деяких порід будуть змінені через переміщення меж природних зон, у деяких випадках окремі продуктивні види повністю зникнуть. Зміняться режими, типи, інтенсивність і частота впливу на ліс різних негативних чинників – комах, збудників хвороб, пожеж, відбудуться зміни в балансі поживних елементів. Є ймовірність зміни репродуктивних циклів лісових порід, динаміки сукцесій. І найголовніше, відбудуться зміни екологічних і соціальних функцій лісів, зменшиться біорізноманіття, особливо стенотопних видів (Buksha *et al.*, 2017). Збільшення зимових температур може спричинити пом'якшення клімату

і розширення ареалу існування певних видів шкідників. Зміна режиму, інтенсивності та частоти опадів також є негативним чинником впливу на лісові екосистеми, що спричиняє погіршення санітарного стану лісів, послаблення та масове всихання деревостанів і підвищення пожежної небезпеки (Buksha *et al.*, 2017; Burdon and Zhan, 2020).

Унаслідок зміни метеоумов певних територій можливе також доволі швидке оновлення видового біорізноманіття в окремих регіонах через загибель одних видів та додавання інших, для яких нові умови будуть комфортними. Це також не може не відбитися на видовому складі шкідливих організмів і на веденні лісового господарства (Hossain *et al.*, 2019). Як зазначено вище, через зміну температурних умов та вологості повітря все більшої ваги набуває проблема інвазій. Інвазійні шкідливі організми загрожують здатності лісів у всьому світі надавати цінні екосистемні послуги (Soloviy and Kuleshnyk, 2008). Проте здатність виявляти такі інвазії патогенів – і, відповідно, розробляти своєчасні заходи з контролю інфекцій є доволі низькою. Серед варіантів систем управління, які могли би підвищити стійкість лісу до патогенів, є: збільшення різноманіття видів дерев. Для вирішення кризових питань, пов'язаних із розвитком інфекційних захворювань на тлі змін температурного режиму, та запобігання таким змінам необхідно створювати та розвивати міжнародне співробітництво в галузі ведення лісового господарства та спостереження за якістю лісових екосистем (Dobson *et al.*, 2020; Pfenning-Butterworth and Buckley, 2024).

Висновки.

1. Підвищення температури повітря суттєвим чином впливає на поширення шкідливих організмів.

2. Оскільки шкідливі організми зазвичай мають широкий спектр адаптаційних можливостей, порівнюючи, наприклад, з деревними рослинами, то їхній вплив на рослину-живителя істотно збільшиться через зміни кліматичних умов для лісів, де ростуть довговічні види.

3. Зміни температурних умов і вологості середовища будуть сприятливими для поширення чужоземних організмів та їхніх переносників.

Джерела фінансування. Статтю підготовлено авторами в рамках науково-дослідного плану «Комплексне дослідження вікових деревостанів та дерев» (0124U003613).

ПОСИЛАННЯ – REFERENCES

- Beukema, S.J., Robinson, D.C.E. and Greig, L.A. (2007) 'Forests, insects and pathogens and climate change' in *Workshop Report*. Prineville, OR, USA: WesternWildlands Environmental Threat assessment Center, 60(1), pp. 133–149. <https://doi.org/10.13140/2.1.4058.4961>
- Bhatti, J.S., Lal, R., Apps, M.J. and Price, M.A. (2008) 'Climate change and managed ecosystems', *Agricultural Systems*, 98(1), pp. 62–63. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.10.003>
- Budnik, Z.M., Hrytsiuk, V.V., Kondratiuk, N.V., Pysarenko, V.O. and Tsipan, Yu.R. (2023) 'Influence of climate factors on the forest ecosystems of the Rivne region', *Bulletin National University of Water and Environmental Engineering*, 102, pp. 18–30 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.31713/vs220232>
- Buksha, I. (2009) 'Climate change and forestry of Ukraine', *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 7, pp. 11–17. Available at: <http://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/482> (Accessed: 12 September 2024) (in Russian).
- Buksha, I.F., Shvidenko, A.Z., Bondaruk, M.A., Tselyshev, O.G., Pyvovar, T.S., Buksha, M.I., Pasternak, V.P. and Krakovska, S.V. (2017) 'Methodology of modelling of the impact of climate change on forest phytocenoses in Ukraine', *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 266, pp. 26–38. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_lis_2017_266_5 (Accessed: 12 September 2024) (in Ukrainian).
- Bulman, L.S., Bradshaw, R.E., Fraser, S., Martín-García, J., Barnes, I., Musolin, D.L., La Porta, N., Woods, A.J., Diez, J.J., Koltay, A., Drenkhan, R., Ahumada, R., Poljakovic-Pajnik, L., Queloz, V., Piškur, B., Doğmuş-Lehtijärvi, H.T., Chira, D., Tomešová-Haataja, V., Georgieva, M., Jankovský, L., Anselmi, N., Markovskaja, S., Papazova-Anakieva, I., Sotirovski, K., Lazarević, J., Adamčíková, K., Boroń, P., Bragança, H., Vettraino, A.M., Selikhovkin, A.V., Bulgakov, T.S. and Tubby, K. (2016) 'A worldwide perspective on the management and control of Dothistroma needle blight', *Forest Pathology*, 46, pp. 472–488. <https://doi.org/10.1111/efp.12305>
- Burdon, J.J. and Zhan, J. (2020) Climate change and disease in plant communities. *PLoS Biology*, 18(11), e3000949. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000949>

- Climate change explained* (2023). Bulletin of Department for Energy Security and Net Zero 20 June 2023. Available at: <https://www.gov.uk/guidance/climate-change-explained> (Accessed: 12 September 2024).
- Davydenko, K. and Meshkova, V. (2017) The current situation concerning severity and causes of ash dieback in Ukraine caused by *Hymenoscyphus fraxineus*/ R. Vasaitis & R. Enderle (eds), *Dieback of European Ash (Fraxinus spp.): Consequences and Guidelines for Sustainable Management*. Uppsala. 220–227. ISBN (print version) 978-91-576-8696-1
- Delgado-Baquerizo, M., Guerra, C.A., Cano-Díaz, C., Egidi, E., Wang, J.-T., Eisenhauer, N., Singh, B. K. and Maestre, F.T. (2020) ‘The proportion of soil-borne pathogens increases with warming at the global scale’, *Nature Climate Change*, 10, pp. 550–554. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0759-3>
- Dobson, A.P., Pimm, S.L., Hannah, L., Kaufman, L., Ahumada, J.A., Ando, A.W., Bernstein, A., Busch, J., Daszak, P., Engelmann, J., Kinnaird, M.F., Li, B.V., Loch-Temzelides, T., Lovejoy, T., Nowak, K., Roehrdanz, P.R. and Vale, M.M. (2020) ‘Ecology and economics for pandemic prevention’, *Science*, 369(6502), pp. 379–81. <https://doi.org/10.1126/science.abc3189>
- FAO (2022) *The State of the World’s forests*. Available at: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/8f599970-661d-45f5-a598-2ea46ca1605f/content/src/html/deforestation-land-degradation.html> (Accessed: 12 September 2024).
- Frankel, S.J., Brown, A.V., Hennon, P.E., Kliejunas, J.T., Lewis, K.J., Worrall, J.J., Woods, A.J. and Sturrock, R.N. (2011) ‘Climate change and forest diseases’, *Plant Pathology*, 60, pp. 133–149. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x>
- Goychuk, A., Kulbanska, I. and Shvets, M. (2021). ‘Tuberculosis pathology of *Fraxinus excelsior* L. in Ukraine: symptomatology, etiology, pathogenesis’, *Scientific Horizons*, 24(5), pp. 69–80, [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(5\).2021.69-80](https://doi.org/10.48077/scihor.24(5).2021.69-80)
- Hordiienko, M.I., Goichuk, A.F., Hordiienko, N.M. and Leontiak, H.P. (1996). *Ash Trees in Ukraine*. Kyiv: Silhosposvita (in Ukrainian).
- Hossain, M., Veneklaas, E. J., Hardy, G. and Poot, P. (2019) ‘Tree host – pathogen interactions as influenced by drought timing: linking physiological performance, biochemical defence and disease severity’, *Tree Physiology*, 39, pp. 6–18. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy113>
- Jung, T. (2009) ‘Beech decline in Central Europe driven by the interaction between *Phytophthora* infections and climatic extremes’, *Forest Pathology*, 39, pp. 73–94. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.2008.00566.x>
- Kirisits, T., Matlakova, M., Mottinger-Kroupa, S., Halmschlager, E. and Lakatos, F. (2010) ‘*Chalara fraxinea* associated with dieback of narrow-leafed ash (*Fraxinus angustifolia*)’, *Plant Pathology*, 59, pp. 4–11.
- Kleczkowski, A., Hoyle, A. and McMenemy, P. (2019) ‘One model to rule them all? Modelling approaches across OneHealth for human, animal and plant epidemics’, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 374(20), pp. 180–225. <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0255>
- Kowalski, T. (2007) ‘*Chalara fraxinea* – a newly described species of fungus on dying ash trees in Poland’, *Sylwan*, 151, pp. 44–48 (in Polish).
- Kurz, W.A., Dymond, C.C., Stinson, G., Rampley, G.J., Neilson, E.T., Carroll, A.L., Ebata, T. and Safranyik, L. (2008) ‘Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change’, *Nature*, 452, pp. 87–90. Available at: <https://www.nature.com/articles/nature06777> (Accessed: 12 September 2024)
- Lahlali, R., Taoussi, M., Laasli, S.-E., Gachara, G., Ezzouggar, R., Belabess, Z., Aberkani, K., Assouguem, A., Meddich, A., El Jarroudi, M. and Barka, E.A. (2024) ‘Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions’, *Crop and Environment*, 3(3), pp. 159–170. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.05.003>
- Lech, P., Mychayliv, O., Hildebrand, R. and Orman, O. (2023). ‘Weather conditions drive the damage area caused by *Armillaria* root disease in coniferous forests across Poland’, *The Plant Pathology Journal*, 39(6), pp. 548–565. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.07.2023.0098>
- Macpherson, M.F., Kleczkowski, A., Healey, J.R. and Hanley, N. (2018) ‘The effects of disease on optimal forest rotation: a generalisable analytical framework’, *Environment and Resource Economy*, 70, pp. 565–588. <https://doi.org/10.1007/s10640-016-0077-4>
- Matsiakh, I. and Kramarets, V. (2020) ‘Invasions of phyllophage insects into the territory of Ukraine’, *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 20, pp. 11 – 23.
- Meshkova, V. (2022a). ‘Alien phytophagous insects in forest and urban stands of Ukraine’, *Bucovina Forestieră*, 22(1), pp. 29-40. <https://doi.org/10.4316/bf.2022.004>
- Meshkova, V. (2022b) ‘Who, where, when, and how damages forest – challenges for prediction and control’, *Environmental Sciences Proceedings*, 22, 71. <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13044>
- Meshkova, V., Borysenko, O., Kucheryavenko, T., Skrylnyk, Y., Davydenko, K. and Holusa, J. (2023) ‘Potential Westward Spread of Emerald Ash Borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 (Coleoptera: Buprestidae) from Eastern Ukraine’, *Forests*, 14, 736. <https://doi.org/10.3390/f14040736>
- Meshkova, V., Borysenko, O., Kucheryavenko, T., Vysotska, N., Skrylnyk, Y., Davydenko, K. and Holusa, J. (2024) ‘Forest Site and Stand Structure Affecting the Distribution of Emerald Ash Borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire, 1888 (Coleoptera: Buprestidae), in Eastern Ukraine’, *Forests*, 15, 511. <https://doi.org/10.3390/f15030511>

- Meshkova, V.L., Turenko, V.P. and Bajdyk, G.V. (2014) Adventive injurious organisms in Ukrainian forests, *The Bulletin of Kharkiv National Agrarian University. Series "Phytopathology and Entomology"*, 3, pp. 1–2. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhnau_ento_2014_1-2_18 (Accessed: 12 September 2024) (in Ukrainian).
- Nie, P., Yang, R., Cao, R., Hu, X. and Feng, J. (2023) ‘Niche and range shifts of the fall webworm (*Hyphantria cunea* Dury) in Europe imply its huge invasion potential in the future’, *Insects*, 14(4), 316. <https://doi.org/10.3390/insects14040316>
- Orlovsky, A.V., Boyko, A.A., Sus, N.P. and Tsvigun, V.O. (2017) ‘Bacterial and viral disease foci of tree plants in forest biocenoses’, *Agroecological Journal*, 4, pp. 114–117 (in Ukrainian).
- Palamarchuk, L.V., Gnatyuk, N.V., Krakowska, S.V., Shedemenko, I.P. and Diukel, G.O. (2010) ‘Seasonal climate changes in Ukraine in the 21st century’, *Scientific works of UkrNDGMI*, 59, pp. 104–120. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/58536/07-Palamarchuk.pdf> (Accessed: 12 September 2024) (in Ukrainian).
- Pfenning-Butterworth, A. and Buckley, L.B. (2024) ‘Interconnecting global threats: climate change, biodiversity loss, and infectious diseases’, *Lancet Planet Health*, 8(4), pp. 270–283. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(24\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00021-4)
- Reshetchenko, S., Boryskina, Y. and Hrekova, Y. (2022) ‘Distribution of air temperature in the territory of Ukraine against the background of current climate changes’, *Problems of Continuous Geographic Education and Cartography*, (35), pp. 25–31 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2022-35-03>
- Riseh, S.R., Fathi, F., Lagzian, A., Vatankhah, M. and Kennedy, J.F. (2024) ‘Modifying lignin: A promising strategy for plant disease control’, *International Journal of Biological Macromolecules*, 271, pp. 132–696. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132696>
- Roberts, M., Gilligan, C.A., Kleczkowski, A., Hanley, N., Whalley, A.E. and Healey, J.R. (2020) The effect of forest management options on forest resilience to pathogens, *Frontiers for Global Change*, 3, 7. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00007>
- Serrano, M., Romero, M., Homet, P. and Gómez-Aparicio, L. (2022) ‘Climate change impact on the population dynamics of exotic pathogens: The case of the worldwide pathogen *Phytophthora cinnamomi*’, *Agricultural and Forest Meteorology*, 322, 109002. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109002>
- Shalovylo, Yu.I., Kovaleva, V.A. and Gou, R.T. (2011) ‘Types of bacterial diseases of conifers’, *Scientific Bulletin of UNFU*, 21(13), pp. 68–71 (in Ukrainian).
- Shvidenko, A.Z., Buksha, I.F. and Krakowska, S.V. (2018) *Vulnerability of Ukrainian Forests to Climate Change*. Kyiv: Nika Center, Available at: https://www.researchgate.net/publication/327558601_Vulnerability_of_Ukraines_forests_to_climate_change (Accessed: 12 September 2024) (in Ukrainian).
- Singh, B.K., Delgado-Baquerizo, M., Egidi, E., Guirado, E., Leach, J.E., Liu, H. and Trivedi, P. (2023) ‘Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward’, *Nature Reviews Microbiology*, 21, pp. 640–656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>
- Soloviy, I.P. and Kuleshnyk, T.Ya. (2008) ‘Climate change and forestry: mutual influences, alternatives, prospects’, *Scientific Bulletin of UNFU*, 18(11), pp. 209–216. Available at: https://nv.ntlu.edu.ua/Archive/2008/18_11/209_Solowij_18_11.pdf (Accessed: 12 September 2024) (in Ukrainian).
- State Forest Resources Agency of Ukraine (2024) *General Characteristics of Ukrainian Forests*. Available at: <https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisi-ukrayini/zagalna-harakteristika-lisiv-ukrayini> (Accessed: 12 September 2024) (in Ukrainian).
- Tokarieva, O., Meshkova, V. and Puzrina, N. (2022). *Pest management in forests of Eastern Europe (Manual)*. NUBiP of Ukraine, 2022. 285 pp. ISBN 978-617-8184-75-9.
- Tsvigun, V., Gumeniuk, I., Levishko, A. and Sus, N. (2022) ‘Viral and bacterial diseases of plants of forest ecosystems of Ukraine’, in *Proceedings of XV Scientific conference of young scientists "Microbiology in modern agricultural production"*. Chernihiv: Institute of Agricultural Microbiology and Agro-Industrial Production of NAAS, pp. 161–163. Available at: https://www.researchgate.net/publication/374412898_Virusni_ta_bakterialni_hvorobi_roslin_lisovih_ekosistem_Ukraini (Accessed: 12 September 2024) (in Ukrainian).
- Tykhomyrova, T. S. and Sorkina, D. K. (2022) ‘Actions of Ukraine and the world on global climate change issues’, in *Proceedings of the International scientific and practical conference with the participation of young scientists "Sectoral Problems of Environmental Safety – 2022", 27 October 2022, Kharkiv*. Kharkiv: Kharkiv National Automobile and Highway University, pp. 205–207. Available at: <https://api.dspace.khadi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/f498e0af-e76e-4bad-a7ab-43f11d708970/content> (Accessed: 12 September 2024) (in Ukrainian).
- Ustskiy, I.M., Zhadan, S.V. and Dyshko, V.A. (2024) *Forest pathology monitoring system* [Online]. Available at: <https://uriffm.org.ua/uk/news/645> (Accessed: 12 September 2024) (in Ukrainian).
- Velasquez, A.C., Castoverde, C.D.M. and He, S.Y. (2018) ‘Plant–pathogen warfare under changing climate conditions’, *Current Biology*, 28, pp. 619–634. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.03.054>

FORECASTING THE DEVELOPMENT OF PATHOGENS AND PESTS BASED ON CLIMATE CHANGES

Khryk V.M.^{1*}, Sytnyk O.S.², Kimeichuk I.V.³, Lozinska T.P.⁴, Masalsky V.P.⁵

The article delves into the pressing issue of forest area reduction driven by climatic changes, which, in turn, trigger a series of interconnected ecological problems. A particularly concerning problem is the spread of pathogenic organisms, which not only affect individual tree species but also have far-reaching impacts on entire forest ecosystems. The review of existing literature highlights that in the past few decades, there has been a significant rise in global temperatures accompanied by a decline in air humidity in many regions around the world. These climatic changes have contributed to the alteration of the geographical distribution of pathogenic organisms and their vectors, resulting in more frequent invasion events. The article identifies major trends in the dispersal and development of pathogenic organisms in new geographical areas. It presents patterns that enable the forecasting of shifts in the species composition of pathogens, their carriers, and the broader forest ecosystems. An interesting and notable trend is the increasing prevalence of fungal diseases in trees, alongside cases of complex bacterial-viral infections in forests. These occurrences are closely linked to the changing temperature regimes in certain regions, which create conditions conducive to the spread and establishment of these diseases. Additionally, the article provides an in-depth analysis of the species composition of pathogenic microorganisms and their hosts under the altered climatic conditions observed in European countries and Ukraine. This analysis is crucial for understanding the dynamics of forest health in these regions and for developing targeted management strategies. The article also collates information on contemporary preventive measures designed to curb the spread of forest infections. It discusses the primary programs and initiatives that have been put in place to contain the impact of pathogenic organisms on forest ecosystems. The international scientific community is taking proactive steps to address the ecological challenges facing forests, particularly on the European continent. These efforts are part of a broader strategy of globalising all processes and fostering international cooperation. One of the key strategies highlighted is the establishment of various international programs. These programs are essential for coordinating the efforts of different countries in developing and implementing joint and localised planning measures. They also focus on monitoring the spread of pathogens and carrying out practical actions aimed at preventing and stopping the proliferation of forest infections. Moreover, these international initiatives are not limited to preventive measures alone; they also encompass research and development aimed at understanding the underlying mechanisms driving the spread of pathogenic organisms. This includes studying the genetic adaptations of pathogens that enable them to thrive in new environments and developing resistant tree species through selective breeding and genetic modification. Such comprehensive approaches are vital for safeguarding the biodiversity and ecological balance of forest ecosystems.

К е у о р д s : pathogens, forest ecosystems, temperature conditions, international collaboration.

Одержано редколегією 08.10.2024

¹ Khryk, Vasyl, Dr. habil. (Pedagogical Sciences), Professor, Bila Tserkva National Agrarian University, Soborna Square 8/1, Bila Tserkva, 09117, Ukraine. E-mail: hvm2020@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1912-3476>

² Sytnyk, Oleksandr, PhD (Agricultural Sciences), Bila Tserkva National Agrarian University, Soborna Square 8/1, Bila Tserkva, 09117, Ukraine. E-mail: sytnykoleksandr24@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2637-1849>

³ Kimeichuk, Ivan, Bila Tserkva National Agrarian University, Soborna Square 8/1, Bila Tserkva, 09117, Ukraine. E-mail: ivan.kimeichuk@btsau.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9100-1206>

⁴ Lozinska, Tetiana, PhD (Agricultural Sciences), Associate Professor, Bila Tserkva National Agrarian University, Soborna Square 8/1, Bila Tserkva, 09117, Ukraine. E-mail: lozinskatat@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7119-0759>

⁵ Masalsky, Vladislav, PhD (Biological Sciences), Associate Professor, Bila Tserkva National Agrarian University, Soborna Square 8/1, Bila Tserkva, 09117, Ukraine. E-mail: vlad.masalskiy71@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8001-2631>

* Correspondence: hvm2020@ukr.net