

АДАПТАТИВНІ РЕАКЦІЇ КОМАХ НА КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ

Волошина Н.О.¹, Сушко Д.Ю.¹, Дубінський Д.В.¹, Волошин О.Г.²

¹Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова
вул. Пирогова, 9, 01030, м. Київ

²Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т. Г. Шевченка
вул. Гетьмана Полуботка, 53, 14013, м. Чернігів
VoloshynaNatali@gmail.com

Зміна клімату – це один із найвагоміших чинників впливу на біологічне різноманіття планети. Зростання температурних показників та екстремальні погодні явища (урагани, тайфуни, штормові вітри, повені, зливи, екстремальні температури та інші) мають для популяції комах як позитивні, так і негативні наслідки. Ентомофауна реагує на зміну не лише кліматичних умов, але і всього комплексу біотичних та абіотичних чинників, зокрема на наявність конкурентів, хижаків, паразитів, симбіонтів, доступність харчового ресурсу, втрату місця помешкання тощо.

У статті узагальнено сучасні відомості про напрями і тенденції досліджень адаптативних реакцій комах на прояви глобальних кліматичних аномалій та загрози структурно-функціональній організації природних та антропогенно змінених екосистем. Описано загрози зміни аборигенної ентомофауни для природних екосистем і наслідки від поширення інвазійних видів у локальному і глобальному контекстах.

Одним із визначальних екологічних чинників, який прямо впливає на чисельність і швидкість росту популяції комах-фітофагів, є температура атмосферного повітря. Реакції-відповіді комах на зміни температурного режиму проявляються у розширенні ареалів; зміні життєвих циклів, морфології, фізіології та етології; набутті фенологічних особливостей; вольтинізму; втраті наявних і формуванні нових взаємозв'язків з іншими видами; зміні структури популяцій, загостренні конкуренції.

Небезпечними для лісових екосистем, зелених насаджень та агроекосистем є вплив видів-інвайдерів, які за сприятливих умов середовища розширюють ареал, подовжують терміни сезонної активності; підвищують плодючість і виживання нових поколінь, що призводить до масових спалахів чисельності популяції виду; впливають на фізіологічний стан рослин, зумовлюючи їхнє пошкодження і послаблення, втрату врожаїв. *Ключові слова:* глобальні кліматичні зміни, комахи, чисельність популяції, ареал, інвазійні види.

Adaptive reactions of insects to climate change. Voloshyna N., Sushko D., Dubinskyi D., Voloshyn O.

Climate change is one of the most important factors influencing the biological diversity of the planet. Rising temperatures and extreme weather events (hurricanes, typhoons, storms, floods, downpours, extreme temperatures, etc.) have both positive and negative consequences for the insect population. Entomofauna responds to changes not only in climatic conditions but also in the whole complex of biotic and abiotic factors: the presence of competitors, predators, parasites, symbionts, availability of food resources, loss of habitat, etc.

The article summarizes current data on the directions and trends of research of adaptive reactions of insects to the manifestations of global climatic anomalies and threats to the structural and functional organization of natural and anthropogenically altered ecosystems. The threats of aboriginal entomofauna change to natural ecosystems and the consequences of the spread of invasive species in local and global contexts are described.

One of the determining environmental factors that directly affect the number and growth rate of phytophagous insects is the temperature of the atmosphere. Insect responses to climate change are manifested in the expansion of habitats; life cycle changes; acquisition of phenological features; voltinism; changes in morphology, physiology and ethology; loss of existing and formation of new relationships with other species and in the population structure, intensification of competition.

Dangerous for forest ecosystems, green plantations and agroecosystems are the influence of invading species, which under favourable environmental conditions expand the range, prolong the seasonal activity, increase fertility and survival of new generations, which leads to mass outbreaks of plant population lead to their damage and weakening, cause crop loss. *Key words:* global climate change, insects, population size, range, invasive species.

Постановка проблеми. Вплив глобальних змін клімату є багатограним, повсюдним і незворотнім із непередбачуваними екологічними та еволюційними наслідками для видів, угруповань, природних та антропогенно змінених екосистем [19].

Незважаючи на міжнародні угоди щодо обмеження викидів парникових газів, Стратегічні плани дій, Концепцію реалізації державної політики у сфері зміни клімату та інші регулюючі документи, клімат на планеті продовжує змінюватись. Усі живі організми нині знаходяться в умовах впливу стрес-фактору та адаптуються до виживання в нових

умовах. Найбільш наглядною реакцією видів тварин і рослин є зміна їх ареалу та перерозподіл видів у середовищах існування, що може змінювати продуктивність і стійкість екосистеми. Очікується, що перерозподіл видів спричинить серйозні зміни у виробництві продуктів харчування і наданні інших послуг екосистемами [7; 8].

Актуальність дослідження. За прогнозами дослідників, близько 30–40 % видів планети загрожує зникнення через втрату їх місць помешкання і неможливості адаптуватися до нових умов. Скорочення біорізноманіття загрожує трансфор-

мацією і руйнуванням екосистем, утратою контролю за шкідниками сільськогосподарських культур і патогенних зоонозних збудників інфекцій, що вже становить понад 70 % нових інфекцій людини. Нині реєструють масові випадки зміни географічних ареалів, сезонної активності, характеру міграції, чисельності популяції видів, що супроводжується трансформаціями на всіх рівнях біологічної системи, починаючи із генетичного і завершуючи екосистемним рівнем [23].

Комахи як одна із найчисельніших та найрізноманітніших груп багатоклітинних організмів мають фундаментальне значення у структурно-функціональній організації наземних і прісноводних екосистем. Тривогу наукової спільноти викликають результати програми моніторингу, які реєструють зростання кількості повідомлень про зменшення чисельності видів комах на всіх континентах [17]. Водночас причини такої ситуації не досить вивчені.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Відсутність глобальної скоординованої системи моніторингових досліджень біологічного різноманіття є основною перешкодою для розуміння наслідків зміни клімату для природних екосистем і розроблення ефективних моделей для прогнозування та управління змінами [11]. Різноманітність видоспецифічних реакцій на сучасні кліматичні аномалії та адаптивні зміни комах потребують систематизації літературних публікацій.

Метою роботи є актуалізація питання втрати біологічного різноманіття ентомофауни та узагальнення розрізнених відомостей, наявних напрямів і тенденцій дослідження реакцій-відповідей комах на зміни клімату.

Методологічне або загальнонаукове значення. Проведено пошук, відбір та аналіз наукових публікацій за темою дослідження. Цей системний огляд сприятиме визначенню напрямків дослідження наслідків глобальних кліматичних змін для ентомофауни та механізмів формування адаптативних реакцій на вплив швидко змінюваних екологічних чинників.

Виклад основного матеріалу. Найвагомішою проблемою у вивченні реакції комах на вплив кліматичних змін є відсутність інформації про види в історичній ретроспективі, а також прогалини у дослідженні їх екологічних особливостей, життєвих та сезонних циклів, типів взаємозв'язків та екологічних ніш, межі ареалів та зони фізіологічних оптимумів для конкретних видів [3; 10].

Комплексний вплив абіотичних чинників на організм пойкилотермних видів, до яких відносять комах, зумовлює різні реакції-відповіді та запускає перебудову адаптивних механізмів. Біотична реакція комах на глобальні кліматичні аномалії проявляється у зміні дисперсії популяцій і синхронізованих коливаннях її чисельності у відповідь на надзвичайні

стресові фактори, такі як зростання частоти екстремальних кліматичних подій, більш інтенсивні опади чи затяжні посухи, температурні рекорди, штормові вітри, пожежі, що виходять за межі історичного діапазону максимальних і мінімальних показників. Такі зміни можуть мати як позитивні, так і негативні наслідки для окремих видів комах [2].

Д. Л. Мусолін виділив шість категорій реакції комах на зміну клімату: 1) межі ареалу; 2) чисельність популяції; 3) фенологічні особливості; 4) вольтизм; 5) морфологія, фізіологія та етологія; 6) типи взаємозв'язків із іншими видами та у структурі популяції [3].

Розширення ареалу окремих видів комах, з одного боку, може збагатити місцеве біорізноманіття, а з іншого – забезпечити зміну видів-домінантів у біоценозі. Видоспецифічним показником є формування межі зони екологічної толерантності, що залежить від комплексу екологічних чинників у конкретному місці помешкання.

Нині зафіксовано зміну ареалів багатьох видів рослин і комах фітофагів у північному напрямку і на висоті вище рівня моря. Ранньовесняне і пізнє осіннє утримання оптимальних температур зумовлює подовження вегетаційного періоду, збільшення біомаси наземних рослин [3]. Дослідження, проведені у Великій Британії, Нідерландах та Австрії, свідчать, що збагачення фауни комах за рахунок розширення ареалу суміжних біоценозів відбувається приблизно у 30 % випадків, тоді як понад 70 % знахідок нових видів мають антропогенне походження за спрямованої або випадкової інтродукції із інших країн або континентів [3]. Неоднозначними є повідомлення, що свідчать на користь абіотичних чинників у розширенні або скороченні ареалу комах або зникненні популяції. Зокрема, у 1963 році після урагану «Карла» у Техасі було зареєстровано велику кількість комах декількох видів, які раніше на цій території не виявлялись [4].

Нині зустрічаються випадки несинхронного і нерівномірного зміщення ареалів комах-фітофагів і рослин, що ними годуються. Такі зміни призводять до порушення трофічних взаємозв'язків, втрати наявного ареалу і, як наслідок, до зменшення популяції, що є катастрофічним насамперед для комах-монофагів [12].

Нині серед шкідників хвойних лісів короїди посідають провідні позиції, постійно розширюючи свої ареали, а зареєстровані випадки уражень, спричинених шкідником, стають більшими за площею і важкістю наслідків. Світову тенденцію поширення цих видів короїдів пов'язують із глобальними кліматичними змінами. Науковці відмічають кращі показники виживання і відтворення видів короїдів у північному напрямку розширення ареалу та колонізацію нових порід дерев, які не мають захисних механізмів і можливості протистояти агресії. В Європі дослідники зареєстрували позитивний зв'язок між зростанням

температурних показників і кількістю агресивних жуків, тоді як менш агресивні види демонстрували протилежну тенденцію. Більш теплі зимові температури дозволяють короїду виживати взимку, колонізувати і розмножуватись у раніше недоступних біоценозах [6; 10; 15]. Водночас дослідники простежують залежність між зростанням кількості уражених короїдами деревостанів Європи і збільшенням частоти штормових вітрів і буревіїв [20].

Зростання температури атмосферного повітря і зменшення кількості опадів мають різні наслідки для екологічних груп комах. Зокрема ксилофаги, поліфаги, термофільні види і еутрофи розширюють свій ареал, зростає інтенсивність спалахів чисельності їх популяцій завдяки високій екологічній пластичності та адаптивній здатності [3]. В інших випадках збільшення екстремальних повеней і низькі температури в лісах Коста-Ріки стали причиною зникнення цілих родів молі, а всихання хвойних лісів призвело до втрати асоційованих із ними комах [17]. Водночас науковці реєструють скорочення чисельності популяцій окремих видів комах унаслідок підвищення смертності особин і зниження плодючості через затяжні періоди спеки [20].

Теплі роки та сума ефективних температур дозволяють окремим видам додатково генерувати покоління. Дослідження, проведені в Іспанії і Великій Британії, зареєстрували більш ранній початок льоту комах (на 17–24 днів раніше) у 85 % місцевих видів порівняно із початком календарного сезону льоту [22].

Окрім того, зміна температури повітря впливає на міжвидову конкуренцію близькоспоріднених видів. Протягом 45-річного періоду спостережень на території Японії було встановлено, що в зоні перехрещування ареалу вид *Nezara viridula* не лише суттєво розширив свій, але і витіснив місцевий близькоспоріднений вид *N. antennata*, який раніше був домінантним. Зміна температури забезпечила умови для високої продуктивності нового виду та його чисельної переваги. М'які зими із середньою температурою +5 °C, здатність до заселення різних місць помешкання, поліфагія, паразитування на дикорослих рослинах і монокультурах забезпечили домінування виду *N. viridula* і витіснення *N. antennata*. Подібні результати зареєстровано у Німеччині та Великій Британії [21].

Подібну ситуацію науковці реєстрували під час дослідження динаміки чисельності популяції кліщів роду *Ixodes* у м. Києві упродовж 28 років, зокрема ранній вихід комах із діапаузи, починаючи із грудня 2006 року порівняно із квітнем у 2003 році; подовження сезонних піків нападів кліщів на жителів; появу двох піків активності; стрибкоподібні спалахи чисельності популяції, починаючи із 2006 року. Ці всі явища автори пов'язують із кліматичними температурними аномаліями в зоні спостереження, формуванням «теплового острова» в урбоекосис-

темі. Водночас, починаючи із 2000 року, відбувається заміщення домінуючого виду *Ixodes ricinus* на *Dermacentor reticulatus* [1].

Більш пізнє сезонне зниження температури зумовлює швидкі темпи розвитку комах і прискорює перебіг фізіологічних процесів, що дозволяє їм бути активними, забезпечуючи прискорення преімагінального розвитку, формування стадії імаго і продукування додаткових генерацій за сезон [14].

За даними J. E. Harrisa, зареєстровано скорочення сезонного вилову жуків в урочищах непошкоджених широколистяних листопадних лісів Європи і Північної Америки у середньому на 83 % у період польових спостережень із 1970 по 2017 роки. Під час експерименту не враховували типові чинники скорочення популяції комах, зокрема, фрагментацію і деградацію середовища існування, використання пестицидів, старіння лісу та інші. Отримані результати пояснюють реакцією ентомофауни на кліматичні зміни, що необоротно призведе до втрати біологічного різноманіття в екосистемах листяних лісів, зникнення провідних хижаків у трофічному ланцюгу та інших наслідків [14].

Не менш важливою екосистемною трансформацією є зміни у структурно-функціональній організації системи «паразит-хазяїн», які проявляються у регулюючому впливі на популяцію комах-фітофагів і рослин. Представлені результати досліджень у заповідному тропічному лісі Коста-Ріки за період з 1997 по 2018 роки виявили зменшення видового різноманіття двокрилих комах на 41 % і на 30,9 % – взаємозв'язків між гусенями та їхніми паразитами [19].

Дослідження етологічних реакцій комах у відповідь на зміну клімату обмежені. Зокрема, зареєстроване масове скупчення клопа *Arocatus melanocephalus* у житлових будинках Італії пояснювали стрімким зростанням кількості дуже спекотних днів із добовим максимумом +30 °C. Зокрема, за період спостереження з 1860 по 2002 роки середні показники температури повітря влітку сягали 23,4 °C, а у 2003 році – 28,6 °C; кількість спекотних днів зросла від 26 до 78 за рік. Немоżliвість комах пережити літню діапаузу у природних умовах (під листям чи у тріщинах кори дерев) змусило їх шукати прохолодніші місця існування [22].

Найвагомішим викликом і загрозою біорізноманіття природних екосистем нині вважають важко контрольоване поширення адвентивних (не місцевих) видів. Біотичні механізми регуляції чисельності популяцій у таких випадках є малоефективними через відсутність природних ворогів виду, їх стрімкі темпи розмноження, формування нових, не характерних для конкретного біоценозу типів зв'язків між його компонентами. Найбільш вразливими до експансії комах-інвайдерів є зелені міські насадження і лісостани. Аборигенні види витісняються монокультурними насадженнями екзотичних дерев. Нові види швидко стають домінантними, суттєво вплива-

ючи на фізіологічний стан рослин, що призводить до їх пошкодження і послаблення.

Серед комах-шкідників 94 % видів виявилися чутливими до зміни кліматичних умов [13]. Понад половини із 31 виду досліджених шкідників-фітофагів сільського або лісового господарства на підвищення температури повітря реагували розширенням ареалу і зміною динаміки чисельності популяції. Водночас екстремальні події (посуха, незначний сніговий покрив узимку) стають причиною масової загибелі деяких шкідників, що вважають корисним ефектом [3]. В окремих видів відмічено трансформацію трофічних взаємозв'язків. Наприклад, спалахи чисельності популяцій виду п'ядуна зимового (*Operophtera brumata*) почали реєструвати на альтернативних рослинах-господарях – карликовій березі і вербі, тоді як раніше цей вид вважався видоспецифічним і паразитував на березі гірській [13].

Окремі види комах-шкідників потребують особливої уваги. Зокрема, ФАО здійснює моніторинг в ендемічних зонах поширення пустельної сарани з метою контролю і своєчасного упередженого реагування на зростання її чисельності. Спостереження, що тривають із 1960 року, мали позитивну динаміку до 2019 року, після чого реєстрували вибух чисельності популяції сарани в Еритреї, Сомалі та Ємені, що пов'язують із кліматичними аномаліями і сильними зливами у цьому регіоні [16; 18].

На основі результатів польових і лабораторних досліджень науковці розробили різноманітні математичні моделі для видів комах за різних кліматичних сценаріїв. Результати обчислень близько 100 варіантів указують на високу ймовірність неочікуваних змін у поширенні та чисельності ентомофауни: від виникнення спалахів їх масового розмноження до зниження тиску на екосистеми. Водночас

у більшості публікацій простежуються загальні тенденції до кращої фенотипової пластичності та виживання видів у регіонах із помірним та холодним кліматом порівняно із представниками теплих кліматичних зон [3; 5; 9]. Комахи високогірних районів мають вищу імовірність виживання за різних сценаріїв зміни клімату через низку причин: високогірні райони менше деградовані антропогенним впливом, мають меншу концентрацію агро- та урболандшафтів і високу екологічну пластичність, що зумовлено доступом до різноманітнішого теплового середовища. Крім того, краще адаптованими є види комах, які знаходяться на вищих трофічних рівнях, мають широку харчову спеціалізацію і є поліфагами. Комахи тропічних районів є більш чутливими до умов потепління, оскільки історично зазнавали менших температурних коливань порівняно із помірними широтами [17].

Висновок. Глобальні кліматичні зміни та екстремальні погодні явища є згубними для біотичного різноманіття лісових екосистем через поширення інвазійних видів. Адаптивні реакції проявляються по-різному залежно від усього комплексу екологічних впливів та ареалу виду, часто будучи неоднозначними і непередбачуваними. Аналіз сучасних джерел літератури не дає однозначної відповіді на питання про наслідки зростання температурних показників як визначального екологічного чинника поширення комах, зміни їх морфології, фізіології та етології. Зміна клімату може сприяти спалахам чисельності окремих видів або зменшувати її через порушення трофічних взаємозв'язків, експансію інвазійних видів, прискорення швидкості фізіологічних процесів тощо. Запровадження єдиної бази біологічного різноманіття може суттєво допомогти у питаннях контролю динаміки популяцій комах в умовах зміни клімату.

Література

1. Акимов И. А., Небогаткин И. В. Иксодовые клещи городских ландшафтов г. Киева : монография. Киев, 2016. 156 с.
2. Мацяк І. П., Крамарець В. О. Інвазії комах-фітофагів на територію України. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2020. Вип. 20. С. 11–25.
3. Мусолин Д. Л., Саулич А. Х. Реакция насекомых на современное изменение климата: от физиологии и поведения до смещения ареалов. *Энтомологическое образование*. 2012. Т. 1. С. 3–35.
4. Научный обзор влияния изменения климата на вредные для растений организмы: глобальная задача по предотвращению и смягчению фитосанитарных рисков в сельском хозяйстве, лесном хозяйстве и экосистемах: ФАО. 2021. URL: <http://www.fao.org/3/cb4769ru/cb4769ru.pdf> (дата звернення: 27.07.2021).
5. Исаев А. С. и др. Оценка характера взаимодействий «лес-насекомые» в лесах бореальной зоны в ходе возможных климатических изменений. *Лесоведение*. 1999. № 6. С. 39–44.
6. Поліщук П. В., Волошина Н. О. Стан вивченості еколого-біологічних та генетичних особливостей представників родини Scolytidae. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2020. Т. 1, № 2 (29). С. 150–157.
7. Про затвердження плану заходів щодо виконання концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року : розпорядження від 06 грудня 2017 р. № 878-П. Веб-сайт. URL: www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennya-planu (дата звернення: 26.07.2021).
8. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року : розпорядження КМУ від 07 грудня 2016 р. № 932-р, веб-сайт. URL: www.kmu.gov.ua/npas/249573705 (дата звернення: 26.07.2021).
9. Рубцова В. В., Уткина И. А. Реакция лесных насекомых-фитофагов на современные изменения климата. *Лесоведение*. 2019. № 5. С. 375–384.
10. Уткина И. А., Рубцова В. В. Современные представления о влиянии изменений климата на взаимодействие лесных деревьев и насекомых-фитофагов. *Лесной вестник*. 2017. Т. 21, № 6. С. 5–12.

11. Pecl G. T. Biodiversity redistribution under climate change: impacts on ecosystems and human well-being. *Science*. 2017. Vol. 35. URL: <https://science.sciencemag.org/content/355/6332/eaai9214/tab-pdf> (Last accessed: 03.08.2021).
12. Schweiger O. et al. Climate change can cause spatial mismatch of trophically interacting species. *Ecology*. 2008. URL: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1890/07-1748> (Last accessed: 07.08.2021).
13. Lehmann P. et al. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2020. Vol. 18, No 3. P. 141–150. URL: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fee.2160> (Last accessed: 12.08.2021).
14. Harrisa J. E. et al. Decline in beetle abundance and diversity in an intact temperate forest linked to climate warming. *Biological Conservation*. 2019. Vol. 240. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S000632071931057> (Last accessed: 03.08.2021).
15. Pureswaran D. S. et al. Forest insects and climate change. *Current Forestry Reports*. 2018. Vol. 4 (2). P. 35–50. URL: https://www.researchgate.net/publication/324836489_Forest_Insects_and_Climate_Change (Last accessed: 07.08.2021).
16. Kenis M. et al. Guide to the classical biological control of insect pests in planted and natural forests. *Food and agriculture organization of the united nations*. 2019 URL: <http://www.fao.org/3/ca3677en/ca3677en.pdf> (Last accessed: 30.07.2021).
17. Halsch A. et al. Insects and recent climate change Christopher. *PNAS*. 2021. No 118 (2). URL: <https://www.pnas.org/content/118/2/e2002543117> (Last accessed: 03.08.2021).
18. Kimathi E. et al. Prediction of breeding regions for the desert locust *Schistocerca gregaria* in East Africa. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-68895-2.pdf> (Last accessed: 03.08.2021).
19. Salcido D. M. Loss of dominant caterpillar genera in a protected tropical forest. *Scientific reports*. 2020. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-57226-9> (Last accessed: 03.08.2021).
20. Jactel H. Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Opinion in Insect Science*, 2019. Vol. 35. P. 103–108. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214574519300227?via%3Dihub> (Last accessed: 07.08.2021).
21. Tougou D. et al. Some like it hot! Rapid climate change promotes changes in distribution ranges of *Nezara viridula* and *Nezara antennata* in Japan. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 2009. No 130 (3). P. 249–258. URL: <https://www.researchgate.net/publication/227695228> (Last accessed: 07.08.2021).
22. Maistrello L. et al. Summer raids of *Arocatus melanocephalus* (Heteroptera, Lygaeidae) in urban buildings in Northern Italy: Is climate change to blame? *Journal of Thermal Biology*. 2006. URL: <https://www.researchgate.net/publication/248534408> (Last accessed: 07.08.2021).
23. Scheffers B. R. et al. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*. 2016. Vol. 354. P. 719–737. URL: <https://www.researchgate.net> (Last accessed: 27.07.2021).