



УДК 234.34.44.55

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.7>

АДАПТАЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ ЛІСОВОЇ МУРАХИ *FORMICA RUFA* ДО АБІОТИЧНИХ СТРЕСІВ І ЇХ ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЛЮДСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

О. В. Кратко¹, А. М. Головатюк², С. В. Кратко³

Механізми адаптації тварин до абіотичних стресових чинників мають велике значення для розуміння їхнього виживання та функціонування в мінливих екологічних умовах, особливо на фоні антропогенних змін довкілля. Лісова мураха *Formica rufa* є модельним видом для дослідження адаптації комах до температурного, водного та світлового стресів і використовується як біоіндикатор екологічного стану лісових екосистем. Метою роботи було комплексне дослідження адаптаційних реакцій *Formica rufa* на основні абіотичні стреси, оцінювання їхнього значення для сталого розвитку людського середовища. У дослідженні застосовано методи польових спостережень, біоіндикації, морфометрії, фізіолого-біохімічного аналізу, а також експериментального моделювання стресових умов. Було проведено оцінювання поведінкових, морфологічних і фізіологічних змін у комах у відповідь на варіації температури, вологості й освітленості.

Результати свідчать про наявність у *Formica rufa* широкого спектра адаптаційних механізмів, що забезпечують підтримку гомеостазу та життєдіяльності в межах оптимальних екологічних параметрів. Найбільш чутливим чинником виявився водний стрес, що порушує соціальну структуру колонії. Отримані дані розширюють знання про екологічну пластичність виду та підкреслюють його значення як біоіндикатора для моніторингу стану природних і антропогенно трансформованих середовищ. Наукова новизна полягає в комплексному підході до вивчення адаптаційних реакцій *Formica rufa* на три основні абіотичні стреси з використанням експериментальних і польових методів. Практична значущість дослідження полягає в можливості застосування результатів для розроблення систем екологічного моніторингу та планування заходів зі сталого управління природними ресурсами, що позитивно впливає на здоров'я та якість життя людини.

Ключові слова: адаптаційні механізми, абіотичні стреси, *Formica rufa*, біоіндикація, екологічна пластичність, поведінкові реакції, сталий розвиток.

¹ кандидат історичних наук, доцент,
завідувачка кафедри біології, екології та методик їх навчання
(Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, м. Кременець)
e-mail: kratkoolya@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2708-4684

² кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання
(Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка, м. Кременець)
e-mail: liudmylam1@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2099-145X

³ здобувач першого бакалаврського рівня вищої освіти
(Державне некомерційне підприємство «Державний університет «Київський авіаційний інститут»», м. Київ)
e-mail: kratkoolya@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2708-4684

ADAPTATION MECHANISMS OF THE FOREST ANT *FORMICA RUFA* TO ABIOTIC STRESSES AND THEIR SIGNIFICANCE FOR HUMAN HEALTH AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE HUMAN ENVIRONMENT

O. V. Kratko, L. M. Holovatyuk, S. V. Kratko

*Adaptation mechanisms of animals to abiotic stressors are important for understanding their survival and functioning in changing environmental conditions, especially against the background of anthropogenic environmental changes. The forest ant *Formica rufa* is a model species for studying the adaptation of insects to temperature, water, and light stresses and is used as a bioindicator of the ecological status of forest ecosystems. The aim of the study was to comprehensively investigate the adaptive responses of *Formica rufa* to the main abiotic stresses and to assess their importance for the sustainable development of the human environment.*

The methods of field observations, bioindication, morphometry, physiological and biochemical analysis, as well as experimental modeling of stress conditions were used in the study. Behavioral, morphological and physiological changes in insects in response to variations in temperature, humidity and light were assessed.

*The results indicate that *Formica rufa* has a wide range of adaptive mechanisms that ensure the maintenance of homeostasis and vital activity within optimal environmental parameters. The most sensitive factor was water stress, which disrupts the social structure of the colony. The data obtained expand knowledge about the ecological plasticity of the species and emphasize its importance as a bioindicator for monitoring the state of natural and anthropogenically transformed environments.*

*The scientific novelty lies in an integrated approach to studying the adaptive responses of *Formica rufa* to three major abiotic stresses using experimental and field methods. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the results to the development of environmental monitoring systems and planning of measures for sustainable management of natural resources, which positively affects human health and quality of life.*

Key words: adaptation mechanisms, abiotic stresses, *Formica rufa*, bioindication, ecological plasticity, behavioral responses, sustainable development.

Вступ

У сучасних умовах інтенсивного антропогенного впливу на природне середовище все більшого значення набуває вивчення механізмів адаптації організмів до абіотичних стресових чинників, що визначають життєздатність екосистем і безпосередньо впливають на сталий розвиток людського середовища. Температурні коливання, зміни вологості, порушення світлового режиму, а також хімічне забруднення довкілля створюють серйозні виклики для збереження біорозмаїття та екологічної рівноваги. Спостереженням за мурахами екологі можуть отримувати важливу інформацію про стан довкілля та вчасно виявляти проблеми, пов'язані із забрудненням (Кратко та ін., 2025).

Лісова мураха *Formica rufa* є ключовим компонентом лісових екосистем, виконує важливі екологічні функції та володіє високою чутливістю до змін абіотичних факторів. Завдяки широкому спектру поведінкових, фізіологічних і морфологічних видів адаптації вона здатна виживати в мінливих умовах і виступає надійним біоіндикатором екологічного стану лісів.

Однак не досить вивчені адаптаційні реакції *Formica rufa* на основні абіотичні стреси – температурний, водний і світловий – з урахуванням їхнього впливу на життєдіяльність виду, що обмежує можливості використання цих знань для екологічного моніторингу та розроблення заходів зі збереження природних ресурсів (Кратко і Вербицький, 2024).

Вивчення адаптаційних механізмів *Formica rufa* у контексті абіотичних стресів є актуальним науковим завданням, яке має безпосереднє практичне значення для формування стратегій сталого розвитку людського середовища, оскільки забезпечення екологічної стабільності покращує умови життя і здоров'я населення.

Механізми адаптації комах до абіотичних стресів широко вивчаються сучасними дослідниками. Зокрема, С.О. Лавренко, О.М. Соболев у своїх працях (2022 р.) висвітлюють вплив температурних коливань на фізіологію *Formica rufa*, а С.А. Решновецький, С.О. Терепищій (2003 р.) та О.В. Кратко (2024 р.) у своїх дослідженнях розглядають поведінкові реакції мурах на водний стрес. Вивчення світлових чинників і порушень циркад-

них ритмів було проведено у працях К.К. Фасулаті, К.Я. Кижаєва (2020 р.).

Водночас більшість досліджень фокусуються на окремих чинниках і не розглядають комплексного впливу температурного, водного та світлового стресів в антропогенно змінених умовах. Також замало уваги приділено ролі адаптації *Formica rufa* для сталого розвитку людського середовища й екологічного моніторингу.

Серед чинників, що впливають на життєдіяльність організмів, важливе місце посідають абіотичні стресові фактори – несприятливі умови неживої природи, які можуть порушувати гомеостаз і спричиняти зміни у фізіології та поведінці живих істот. До таких чинників належать температура, вологість, освітленість, кислотність, засолення, тиск, радіація, забруднення довкілля, а також нестача або надлишок поживних речовин. Їхній вплив може бути як гострим (раптовим), так і хронічним (тривалим), що зумовлює необхідність адаптивних реакцій.

Реакція тварин на абіотичний стрес визначається видовими особливостями, рівнем екологічної пластичності, ареалом поширення та витривалістю. Еврибанти демонструють високу адаптивність завдяки активній регуляції гомеостазу та метаболічній перебудові, тоді як стенобіанти обмежені пасивними формами пристосування, зокрема структурною стійкістю (Malovanyu et al., 2021).

У тварин адаптація до абіотичних стресів реалізується через поведінкові (уникнення несприятливих умов шляхом міграцій, сплячки, зміни добової активності) та фізіологічні механізми (терморегуляція, зміна метаболізму, накопичення енергетичних ресурсів). У деяких видів спостерігається акліматизація – поступове формування адаптивних змін у відповідь на тривалий вплив стресових чинників (Кратко та ін., 2023).

Метою дослідження є проведення аналізу механізмів адаптації тварин до абіотичних стресових чинників, зокрема оцінювання впливу різних типів стресів на життєдіяльність організмів, визначення їхніх адаптивних властивостей на прикладі конкретного виду. У процесі написання роботи було розглянуто теоретичні аспекти адаптації тварин, проаналізовано методи оцінювання адаптивних реакцій, а також проведено серію спостережень з метою виявлення поведінкових і фізіологічних відповідей на абіотичні стреси.

Для досягнення мети дослідження були поставлені такі завдання: 1) вивчити та проаналізувати наукові й інтернет-джерела щодо властивостей адаптації тварин до абіотичних стресових чинників; 2) проаналізувати вплив основних абіотичних стресів на поведінку, фізіологію та загальну життєдіяльність досліджуваного виду; 3) вивчити механізми адаптації, зокрема поведінкові реакції, зміни фізіологічного стану й особливості соціальної організації в умовах дії стресових чинників.

Матеріал і методи

Під час дослідження адаптації *Formica rufa* до абіотичних стресових чинників застосовувалися комплексні методи, які дозволили всебічно оцінити реакції виду на змінні умови середовища.

По-перше, для вивчення поведінкових реакцій комах використовувалися етологічні методи. Зокрема, проведено польові спостереження, що включали моніторинг активності колоній, аналіз змін добової активності, пошукової поведінки та рівня агресивності у природних умовах. Додатково, з використанням біотелеметрії та відеоаналізу, за допомогою камер і міток здійснювався моніторинг просторової активності колоній.

По-друге, для вивчення морфологічних видів адаптації проведено морфометричний аналіз, що включав вимірювання розмірів тіла, кінцівок, антен і щелеп у різних каст мурах (робочих, солдатів).

Окрім того, застосовувалися екологічні польові методи, які надали інформацію про адаптивні особливості виду у природному середовищі. Здійснювався моніторинг популяцій *Formica rufa* з оцінюванням чисельності, структури колоній. Біоіндикаційні дослідження дозволили встановити реакції мурашників на забруднення важкими металами, зміни рН ґрунту та присутність пестицидів. Також проводився аналіз мурашників як екосистемних одиниць із визначенням температурного режиму, вологості усередині гнізд і сезонної активності колоній.

Результати

Отримані результати дають змогу комплексно характеризувати механізми адаптації лісової мурахи до абіотичних стресів і застосовувати цей вид як ефективний біоіндикатор стану лісових екосистем.

Комахи, зокрема *Formica rufa*, демонструють широкий спектр адаптивних механізмів, що дозволяють виживати

та функціонувати в умовах мінливого середовища.

Температура є ключовим чинником, що визначає активність лісової мурахи. У межах помірної кліматичної зони *Formica rufa* демонструє сезонну ритміку активності: узимку мурашник впадає у стан спокою, знижуючи метаболічну активність, а в теплі сезони активізується. Лісові мурахи здатні регулювати мікроклімат у мурашнику за допомогою архітектурних особливостей: будуючи купол із хвої, трави та ґрунту, вони забезпечують термоізоляцію та вентиляцію. Колонії активно змінюють положення личинок залежно від температури – переносять їх у глибші або верхні шари гнізда (Ghazoul, 2006).

Хоча *Formica rufa* не є мешканцем аридних зон, зміни вологості середовища суттєво впливають на її життєдіяльність. У відповідь на посуху мурахи закривають входи до мурашника, зменшуючи випаровування. Їхня кутикула має восковий шар, що запобігає втратам води. У разі надлишкової вологості спостерігається поведінкова реакція – евакуація колонії до підвищених ділянок ґрунту, перенесення яєць і лялечок у сухіші частини гнізда (Решновецький і Терепищій, 2023).

Освітленість регулює добову активність лісової мурахи. У денні години, за надмірного освітлення та високої температури активність знижується, що знижує ризик перегріву. Натомість уранці та ввечері фіксується пік активності, коли умови є найбільш сприятливими. Вплив штучного освітлення поблизу антропогенних локацій може порушувати циркадні ритми виду, змінювати орієнтацію під час фуражування та негативно позначатися на пошуку їжі (Buchori et al., 2018).

Лісові мурахи є чутливими до хімічного забруднення, що робить їх ефективними біоіндикаторами екологічного стану лісових екосистем. У зонах промислового або транспортного забруднення спостерігаються зменшення чисельності колоній, зниження активності, порушення структури гнізд. Накопичення важких металів у тілі робочих особин знижує їхню тривалість життя та зменшує репродуктивну здатність матки. Водночас у деяких регіонах спостерігається формування адаптивних реакцій – підвищення антиоксидантного захисту (Tibcherani et al., 2018).

Formica rufa реалізує адаптацію до стресових факторів через:

- поведінкові механізми: регулювання активності, переміщення колонії, зміну структури гнізда;

- фізіологічні зміни: терморегуляцію, зниження метаболічної активності в несприятливий період;

- морфологічні особливості: щільна кутикула з гідрофобним покриттям захищає від втрат вологи та шкідливих речовин;

- соціальні адаптації: колективну терморегуляцію та взаємодопомогу між особинами колонії.

Адаптації комах до несприятливих чинників довкілля є результатом складних еволюційних процесів, що охоплюють поведінкові, морфологічні, фізіолого-біохімічні та молекулярно-генетичні зміни. Особливо це стосується екологічно чутливих видів, як-от лісова мураха (*Formica rufa*), що широко використовується як модельний об'єкт у біоіндикаційних і екологічних дослідженнях. Для вивчення механізмів адаптації комах застосовують низку сучасних методів (Лавренко та ін., 2022; Melnyk et al., 2023).

Аналіз адаптації проводився з урахуванням екологічної валентності виду та його меж: оптимуму, песимуму та критичних точок.

Щодо температурного режиму, оптимальним для активності *Formica rufa* є діапазон від +18 до +25°C, за якої комахи активно виконують життєво важливі функції – будівництво гнізд, збір корму, догляд за потомством. За температур нижче ніж +10°C спостерігається суттєве зниження активності: мурахи залишаються у гнізді й уповільнюють пересування, що свідчить про зниження метаболічної активності. Високі температури, понад +30°C, призводять до пригнічення активності, перегріву тіла та гнізда, що може спричиняти загибель особин. За температур нижче 0°C також спостерігається смертельний вплив. Критичною для виживання є температура понад +35°C, за якої відбувається масова загибель від перегріву (Фасулаті і Кижасєва, 2020).

Залежність активності *Formica rufa* від температури та її зони толерантності показано на рисунку 1.

Графік ілюструє зміну активності *Formica rufa* залежно від температурних показників. Оптимальний діапазон температур для активної життєдіяльності цього виду становить +18 – +25°C, тоді як

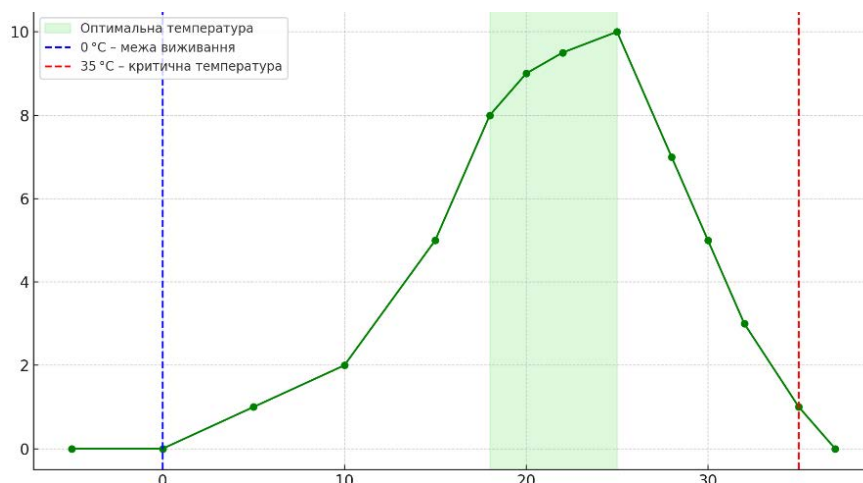


Рис. 1. Залежність активності мурах *Formica rufa* від температури (°C). Активність (умовна шкала)

критичні межі толерантності настають за температур нижче 0°C та вище +35°C.

У таблиці 1, на основі проведеного аналізу та власних спостережень, представлено вплив різних температурних режимів на активність *Formica rufa*, наведено діапазони температур, оцінку рівня активності та характерні особливості поведінки *Formica rufa*.

Аналіз літературних джерел, інтернет-ресурсів і власних спостережень показав, що для *Formica rufa* характерні поведінкові адаптації, як-от глибоке розташування камер у мурашнику, переміщення та вибір затінених ділянок для будівництва гнізд, а також скорочення активності особин у спекотний період. Завдяки цим механізмам лісова мураха демонструє середній рівень толерантності (витривалості) до температурних коливань. Водночас *Formica rufa* належить до стенотермних організмів, що свідчить

про обмежений діапазон її екологічної валентності.

Особливості пристосування до вологості полягають у переважному будівництві гнізд у місцях із помірною вологістю. Оптимальні умови для активної життєдіяльності комах забезпечує вологість ґрунту та повітря в межах 40–70%. За зниження вологості до приблизно 30% спостерігається зниження активності *Formica rufa*, що підвищує ризик зневоднення, тобто в таких умовах активність переходить у зону песимуму. Надлишкова вологість (приблизно 80%) призводить до ризику затоплення гнізд, сприяє розвитку грибкових і бактеріальних інфекцій, що відповідає критичній точці і може спричинити загибель значної частини особин або навіть цілої колонії.

Власні спостереження свідчать, що *Formica rufa* будує гнізда з вентиляційними каналами, які, імовірно, забезпе-

Таблиця 1

Вплив температури на активність *Formica rufa*

Діапазон температур (°C)	Оцінка активності (0–1)	Характеристика
≤0	0	Критична точка: загибель від холоду.
1–9	0,1–0,3	Активність дуже пригнічена, мурахи ховаються у гніздо.
10–17	0,4–0,8	Перехід до активності, спостерігається сповільнення руху.
18–25	1,0	Оптимум: активна діяльність, усі функції виконуються.
26–30	0,7–0,9	Висока активність, можливе поступове зниження.
31–34	0,3–0,6	Перегрівання, зниження активності.
≥35	0	Критична точка: загибель від перегріву.

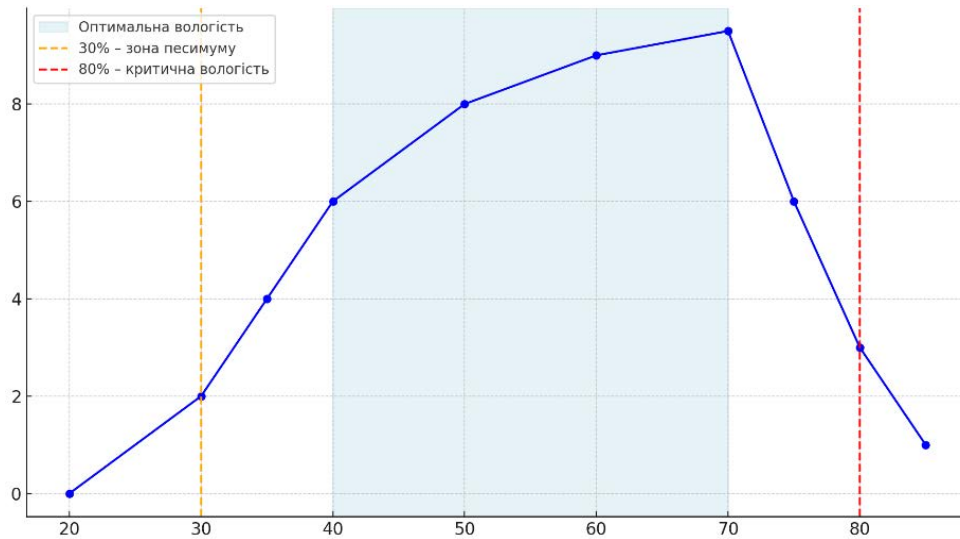


Рис. 2. Залежність активності мурах *Formica rufa* від вологості (%). Активність (умовна шкала)

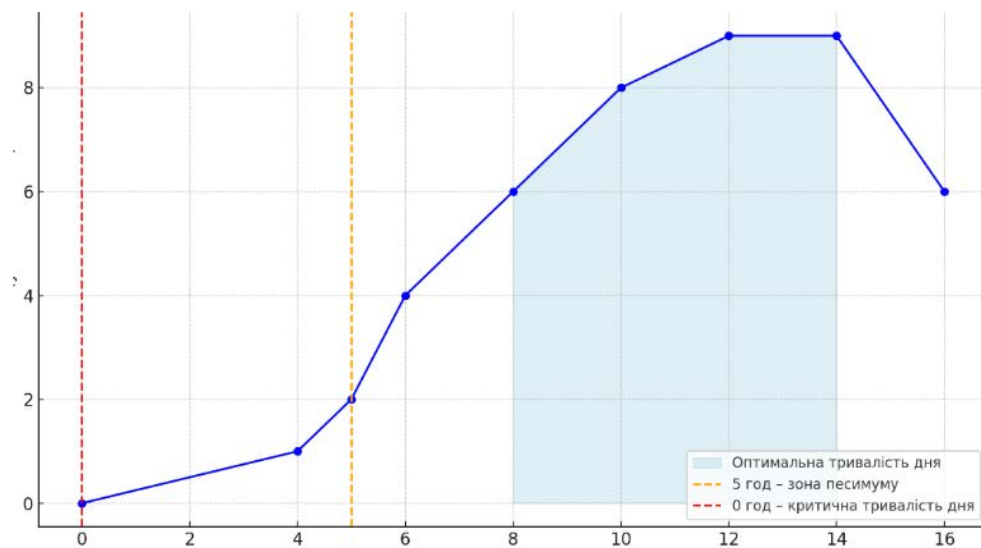


Рис. 3. Залежність активності мурах *Formica rufa* від тривалості світлового дня (години). Активність (умовна шкала)

Таблиця 2

Вплив вологи на активність *Formica rufa*

Відносна вологість (%)	Оцінка активності (0–1)	Характеристика
<30	0–0,4	Песимум: ризик зневоднення, зниження активності.
30–39	0,4–0,7	Перехідна зона, адаптація до помірної нестачі вологи.
40–70	1,0	Оптимум: максимальна активність, сприятливі умови.
71–79	0,6–0,3	Перехід до несприятливих умов, можливе порушення мікроклімату у гнізді.
≥80	↓ до 0	Критична точка: загроза затоплення гнізда, розвиток хвороб, загибель.

чують регуляцію мікроклімату всередині колонії. Це є одним із ключових пристосувань до коливань температури та вологості. Окрім того, колонії часто розташовуються в місцях із природним дренажем, що запобігає застою води.

Залежність активності *Formica rufa* від вологості та зони толерантності наведено на рисунку 2.

У таблиці подано інформацію про вплив вологи на активність *Formica rufa*, наведено діапазон відносної вологості, оцінку активності в межах визначеної вологості й особливості поведінки (табл. 2).

Досліджуваний вид є денним, його активність залежить від тривалості світлового дня. Оптимальна тривалість освітлення для нормальної активності та життєдіяльності становить приблизно 8–14 годин на добу. За умови скорочення світлового дня до 4–5 годин у колоніях спостерігається зниження активності, що особливо помітно у весняно-осінній період. Отже, значне скорочення світлового дня призводить до переходу життєдіяльності *Formica rufa* в умови песимуму. Це свідчить про те, що вид є еврибіонтом за показником вологості, оскільки має широкий діапазон екологічної валентності (толерантності). У разі цілковитої темряви, що триває кілька діб, у мурах втрачається орієнтація, їхні життєві функції припиняються, що відповідає умовам критичної точки.

Залежність активності *Formica rufa* від тривалості світлового дня та зони толерантності наведено на рисунку 3.

Світло-блакитна зона відповідає оптимальній тривалості світлового дня (8–14 годин), у якій активність мурах є найвищою. Пунктирна оранжева лінія (5 годин) позначає зону песимуму, де активність різко знижується. Пунктирна червона лінія (0 годин) відповідає критичній точці, за якої активність цілковито відсутня.

У таблиці наведено інформацію про вплив тривалості світлового дня на активність *Formica rufa*, зокрема тривалість світлового дня, оцінку активності у відповідних межах і особливості поведінки з урахуванням екологічної валентності (толерантності) (табл. 3).

Варто відзначити, що мураху мають добре розвинену здатність до орієнтації у просторі за допомогою світла – явище, відоме як фототаксис. За відсутності світла (наприклад, у похмуру погоду) комахи орієнтуються за допомогою феромонів і слідових сигналів.

Обговорення

Досліджуваний вид є адаптованим зразком тварин із середнім рівнем екологічної пластичності (толерантності). Найбільш сприятливими умовами для активності *Formica rufa* є температурний діапазон 18–25°C, комфортна помірна вологість та тривалість світлового дня не менш ніж 8 годин. Перевищення критичних меж за будь-яким із проаналізованих факторів призводить до порушення життєдіяльності або навіть загибелі окремих особин чи цілої колонії.

Завдяки численним поведінковим і фізіологічним видам адаптації *Formica rufa* є важливою ланкою екосистем і широко використовується як біоіндикатор в екологічних дослідженнях.

Дослідження проводилися у весняно-осінній період, під час якого спостерігалися різні типи абіотичних стресів, зокрема температурний, водний і світловий стреси. Температурний стрес: спостерігалось підвищення температури до +40°C, що перевищувало оптимальні умови для *Formica rufa*. Вплив підвищеної температури тривав приблизно 48 годин, що спричиняло пригнічення активності, перегрів гнізда та загибель окремих особин. Водний стрес: за умов зменшення

Таблиця 3

Вплив тривалості світлового дня на активність *Formica rufa*

Світловий день (годин/день)	Оцінка активності	Характеристика умов
0–3	0–0,2	Критична точка: дезорієнтація, зупинка функціонування.
4–7	0,3–0,6	Песимум: активність знижена, сезонне уповільнення.
8–14	1,0	Оптимум: максимальна активність, виконання всіх функцій.
>14	1,0–0,8	Допустимі умови: активність висока, можливий перегрів.

Таблиця 4

Результати спостереження за *Formica rufa*

Тип стресу	Основні симптоми/поведінкові реакції	Зміни (%)
Температурний	Зменшення активності, припинення будівельної поведінки, часткове припинення фуражування.	30
Водний	Зменшення внутрішньокolonіальної комунікації, збільшення смертності личинок.	40
Світловий	Порушення циркадних ритмів, некоординована поведінка, втрата орієнтації.	35

Примітка. Значення змін (%) є умовними й оціненими нами на основі інтенсивності прояву поведінкових порушень за нашими власними спостереженнями.

доступу до води на 70% від норми протягом 5 днів відзначено зниження активності мурах, що свідчить про значний вплив на фізіологічний стан колонії. Світловий стрес: моделювання порушення денного світлового режиму здійснювалося шляхом освітлення вночі (за допомогою ліхтарика) та затемнення гнізда вдень темним агроволокном. Це призвело до порушення добової активності й орієнтації комах.

На основі власних спостережень і створення контрольованих умов для аналізу адаптаційних змін у *Formica rufa* було проведено відповідні дослідження (табл. 4).

Висновки

Отже, на основі власних спостережень і експериментальних досліджень було встановлено, що мурахи *Formica rufa* найбільше чутливі до водного стресу, який призводив до значного порушення соціальної структури та функцій колонії. Зокрема, після штучного зволоження мурашника спостерігалось переміщення мурах в іншому напрямку. Температурний стрес мав менш виражений вплив, оскільки колонія швидко адаптувалася до змін температури, змінювала поведінку: більшість особин залишалися у гнізді або працювали в затінених ділянках. Світловий стрес виявився менш критичним, проте спричинив порушення орієнтаційних ритмів у досліджуваних мурах.

У процесі дослідження було комплексно проаналізовано адаптаційні механізми лісової мурахи *Formica rufa* у відповідь

на вплив основних абіотичних стресових чинників – температурного, водного та світлового стресів. Установлено, що *Formica rufa* володіє широким спектром поведінкових, фізіологічних і морфологічних видів адаптації, які забезпечують виживання виду у змінних екологічних умовах, характерних і для антропогенно трансформованих територій.

Оптимальні умови для життєдіяльності виду включають температурний діапазон +18 – +25 °C, відносну вологість 40–70% та тривалість світлового дня 8–14 годин. Перевищення критичних меж цих чинників призводить до значного зниження активності або загибелі окремих особин і колоній. Найбільш чутливим чинником виявився водний стрес, що суттєво порушує соціальну організацію колонії. Температурний і світловий стреси спричиняють адаптивні зміни, що свідчить про середній рівень екологічної пластичності виду.

Завдяки високій адаптивності та чутливості до змін навколишнього середовища *Formica rufa* є ефективним біоіндикатором стану лісових екосистем і, відповідно, стану довкілля, що має безпосередній вплив на здоров'я і якість життя людини. Результати дослідження підкреслюють важливість урахування адаптаційних механізмів цього виду в системах екологічного моніторингу та плануванні заходів зі збереження природних ресурсів, що є складником сталого розвитку людського середовища.

Список використаної літератури

- Кратко О.В., Головатюк Л.М., Середюк А.О., Кратко С.В. Біоіндикація стану атмосферного повітря міста Кременця Тернопільської області. *Technologies, innovative and modern theories of scientists: International scientific and practical conference* – 2023 : збірник наукових праць. Graz, Austria, 2023. С. 41–45.
- Кратко О.В., Вербицький О.Г. Біомоніторинг стану довкілля з використанням рослинних індикаторів. *Механізм старіння в біології (Mechanism of aging in biology)* – 2024 : збірник наукових праць. Київ, 2024. С. 174–178.
- Кратко О.В., Головатю Л.М., Бондар О.Б. Комахи – біоіндикатори забруднення наземних екосистем. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 11. С. 43–49. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.5>.

Лавренко С.О., Соболев О.М., Корбич Н.М. Напрями та перспективи використання комах-запилювачів для біоіндикації стану екосистеми та змін клімату в умовах півдня України. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2022. Вип. 1 (47). С. 80–90.

Решновецький С.Л., Терепищій С.О. Чорні садові мурахи в соснових лісах Боярського лісництва. *Вісник Харківського інституту соціального прогресу*. 2003. Вип. 1 (34). С. 23–26.

Фасулаті К.К., Кизжаєва К.Я. До вивчення фауни і екології мурашок (*Hymenoptera, Formicidae*) Українських Карпат. *Комахи Українських Карпат і Закарпаття*. Київ, 2020. С. 92–99.

Buchori D., Rizali A., Rahayu G., Mansur I. Insect diversity in post-mining areas: Investigating their potential role as bioindicator of reclamation success. *Biodiversitas*. 2018. Vol. 19. P. 1696–1702. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d190515>.

Ghazoul J. Floral diversity and the facilitation of pollination. *Journal of Ecology*. 2006. Vol. 94. P. 295–304. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01098.x>.

Malovanyy M., Korbut M., Davydova I., Tymchuk I. Monitoring of the Influence of Landfills on the Atmospheric Air Using Bioindication Methods on the Example of the Zhytomyr Landfill, Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Vol. 22. № 6. P. 36–49. <https://doi.org/10.12911/22998993/137446>.

Melnyk Y., Bondar O., Sydorenko S., Tsytsiura N., Tryhuba O., Dukh O., Halahan O., Kratko O. Peculiarities of middle-aged scots pine forests development after surface fires in Kremenchuk green area, Ukraine. *Forestry Ideas*. 2023. Vol. 29. № 2. P. 272–286. URL: <https://orcid.org/0000-0002-3448-8943>.

Tibcherani M.F., Nacagava V.A., Aranda R.A., Mello R.L. Review of Ants (*Hymenoptera: Formicidae*) as bioindicators in the Brazilian Savanna. *Sociobiology*. 2021. Vol. 65. № 2. P. 112–129. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v65i2.2048>.

References

Kratko, O.V., Holovatyuk, L.M., Seredyuk, A.O., & Kratko, S.V. (2023). Bioindykacija stanu atmosfernogho povitrja mista Kremenja Ternopiljskoji oblasti [Bioindication of the state of atmospheric surface of the town of Kremenja, Ternopil region]. *International scientific and practical conference “Technologies, innovative and modern theories of scientists – 2023” [International scientific and practical conference “Technologies, innovative and modern theories of scientists – 2023”]*. Graz, 41–45 [in Ukrainian].

Kratko, O.V., & Verbytskyi, O.G. (2024). Biomonitoryng stanu dovkillja z vykorystannjam roslynnykh indykatoriv [Biomonitoring of the environment using plant indicators]. *Mekhanizm starinnja v biologiji – 2024 [Mechanism of aging in biology – 2024]*. Kyiv, 174–178 [in Ukrainian].

Kratko, O.V., Holovatiuk, L.M., & Bondar, O.B. (2025) Komakhy – bioindykatory zabrudnennia nazemnykh ekosystem. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnykh nauk: naukovyi zhurnal – 2025*. Kyiv, 43–49 [in Ukrainian].

Lavrenko, S.O., Sobol, O.M., & Korbych, N.M. (2022). Naprjamky ta perspektyvy vykorystannja komakh-zapyljuvachiv dlja bioindykaciji stanu ekosystemy ta zmin klimatu v umovakh pivdnja Ukrainy [Directions and prospects of using pollinating insects for bioindication of ecosystem status and climate change in the south of Ukraine]. *Visnyk Sums'kogho nacional'nogho aghrarnogho universytetu [Bulletin of Sumy National Agrarian University]*, 1 (47), 80–90 [in Ukrainian].

Reshnovetskyi, S.L., & Terapyshchy, S.O. (2023). Chorni sadovi murakhy v sosnovykh lisakh Bojars'kogho lisnytva [Black garden ants in the pine forests of the Boyarsky forestry]. *Visnyk Kharkiv'skogho instytutu social'nogho proghresu [Bulletin of the Kharkiv Institute for Social Progress]*, 1 (34), 23–26 [in Ukrainian].

Fasulati, K.K., & Kizhaeva, K.Y. (2020). Do vyvchennja fauny i ekologiji murashok (*Hymenoptera, Formicidae*) Ukrajin'skykh Karpat [On the study of the fauna and ecology of ants (*Hymenoptera, Formicidae*) of the Ukrainian Carpathians]. *Komakhy Ukrajin'skykh Karpat i Zakarpattja [Insects of the Ukrainian Carpathians and Transcarpathia]*. Kyiv, 382–383 [in Ukrainian].

Buchori, D., Rizali, A., Rahayu, G., & Mansur, I. (2018). Insect diversity in post-mining areas: Investigating their potential role as bioindicator of reclamation success. *Biodiversitas* [in English].

Ghazoul, J. (2026). Floral diversity and the facilitation of pollination. *Journal of Ecology*, 94, 295–304 [in English].

Malovanyy, M., Korbut, M., Davydova, I., & Tymchuk, I. (2021). Monitoring of the Influence of Landfills on the Atmospheric Air Using Bioindication Methods on the Example of the Zhytomyr Landfill, Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 22 (6), 36–49 [in English].

Melnyk, Y., Bondar, O., Sydorenko, S., Tsytsiura, N., Tryhuba, O., Dukh, O., Halahan, O., & Kratko, O. (2023). Peculiarities of middle-aged scots pine forests development after surface fires in Kremenchuk green area, Ukraine. *Forestry Ideas*, 29 (2) [in English].

Tibcherani, M.F., Nacagava, V.A., Aranda, R.A., & Mello, R.L. (2021). Review of Ants (*Hymenoptera: Formicidae*) as bioindicators in the Brazilian Savanna. *Sociobiology*, 65 (2), 112–129 [in English].

Отримано: 22.07.2025
Прийнято: 29.08.2025
Опубліковано: 17.10.2025

