МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет водогосподарської інженерії та екології
Кафедра екології

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Зав. кафедрою екології
доц._____Вікторія КАЦЕВИЧ
«_____» червня 2026 р.

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «Бакалавр»
на тему: **«Стійкість клену татарського (Acer tataricum) до життєдіяльності фітопатогенів в умовах м. Дніпро»**

Виконала: здобувачка вищої освіти 4 курсу,
групи Ез-1-21 спеціальності 101 «Екологія»

_____ Анна КАРПУСЕНКО

Керівник_____проф. Кирило ГОЛОБОРОДЬКО

Дніпро 2026

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Водогосподарської інженерії та екології
Кафедра: Екології
Освітньо-професійна програма: «Екологія»
Спеціальність: 101 «Екологія»
Ступінь вищої освіти: Бакалавр

ЗАТВЕРДЖУЮ:
зав. кафедрою екології
доц. _____Вікторія КАЦЕВИЧ
«_____»_____202__ р.

ЗАВДАННЯ

напідготовку кваліфікаційної роботи

Карпусенко Анни Вадимівни

(прізвище,ім'я,побатькові)

1. **Тема роботи:** Стійкість клену татарського (Acer tataricum) до життєдіяльності фітопатогенів в умовах м. Дніпро. _

Науковий керівник: Голобородько К.К., д.б.н., професор

Затверджена наказом по ДДАЕУ від «24» квітня 2026 р. №821

2. **Термін подання здобувачем роботи:** _____р.

3. **Вихідні дані до роботи:** гербарій фітопатологічних ушкоджень листя дерев Ботанічного саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара; гербарій НДЛ лісового господарства ДДАЕУ.

4. **Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)**: описати біологічні особливості клену татарського; описати екологічні особливості борошнистої роси; описати методи і матеріали досліджень; описати особливості ураження борошнистою росою листя клена татарського в умовах м. Дніпро; надати характеристику особливостей впливу борошнистої роси на процеси фотосинтезу клена татарського умовах ботанічного саду ДНУ.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Природний ареал клену татарського; біологічна характеристика клена татарського; схема території Ботанічного саду ДНУ; фотографії ураження борошнистою росою; варіація параметрів флуоресценції хлорофілу між пошкодженим та непошкодженим листям дерев; порівняння параметрів флуоресценції хлорофілу між непошкодженим та пошкодженим листям дерев; Порівняння параметрів температури, вологості та інтенсивності світла між непошкодженим та пошкодженим листям дерев.

6. Дата видачі завдання: «_____»_____202____ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пп	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел за темою дипломної роботи	01.09.25-30.12.25	Виконано
2	Характеристика методів проведених досліджень	01.01.26-30.01.26	Виконано
3	Опис отриманих даних	01.02.26-30.04.26	Виконано
4	Аналіз отриманих результатів	01.03.26-30.04.26	Виконано
5	Оформлення рукопису	01.05.26-3005.26	Виконано

Здобувачка _____ Анна КАРПУСЕНКО
(підпис) (Ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____ Кирило ГОЛОБОРОДЬКО
(підпис) (Ім'я та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню особливостей впливу борошнистої роси на фотосинтетичні процеси клену татарського в умовах Ботанічного саду ДНУ (м. Дніпро).

Робота містить 43 сторінки тексту, 2 таблиці, 8 рисунків, 41 літературне джерело. Структура роботи складається з чотирьох розділів, у яких детально висвітлено результати проведених досліджень.

Об’єкт досліджень: клен татарський.

Предмет досліджень: вплив борошнистої роси на процеси фотосинтезу клену татарського.

Мета роботи – виявити особливості впливу життєдіяльності борошнистої роси на процеси фотосинтезу клену татарського в умовах Ботанічного саду ДНУ.

Для досягнення поставленої мети поставлено такі задачі:

1. Охарактеризувати біологічні особливості клену татарського.
2. Надати характеристику життєдіяльності борошнистої роси.
3. Провести аналіз ураження клену татарського борошнистою росою на території Ботанічного саду ДНУ.
4. З’ясувати особливості впливу борошнистої роси на процеси фотосинтезу клену татарського.

Методи дослідження: біофізичні; ботанічні, екологічні.

Ключові слова: клен татарський, борошниста роса, процеси фотосинтезу, вимірювання процесів фотосинтезу, ботанічний сад ДНУ.

ЗМІСТ

ВСТУП 6

РОЗДІЛ 1. БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КЛЕНУ ТАТАРСЬКОГО (ACER TATARICUM L.) 7
1.1. Ботанічна характеристика 7
1.2. Систематика 12

РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ БОРОШНИСТОЇ РОСИ 14
2.1. Біологічна характеристика 14
2.2. Вплив на деревні рослини 17
2.3. Засоби контролю 20

РОЗДІЛ 3. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ 23
3.1. Польові дослідження 23
3.2. Техніка безпеки у Ботанічному саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара 25

РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ УРАЖЕННЯ БОРОШНИСТОЮ РОСОЮ КЛЕНУ ТАТАРСЬКОГО В УМОВАХ БОТАНІЧНОГО САДУ ДНУ 28

РОЗДІЛ 5. ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ БОРОШНИСТОЇ РОСИ НА ПРОЦЕСИ ФОТОСИНТЕЗУ КЛЕНУ ТАТАРСЬКОГО 34

ВИСНОВКИ 38

ЛІТЕРАТУРА 39

ВСТУП

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю оптимізації та збереження зелених насаджень у великих промислових центрах України, серед яких місто Дніпро посідає одне з провідних місць за рівнем антропогенного навантаження. В умовах прогресуючих змін клімату та високої загазованості повітря особливої ваги набуває підбір стійких, невибагливих та екологічно пластичних деревних порід. Клен татарський (Acer tataricum) є одним із ключових елементів міського озеленення завдяки своїй посухостійкості, солевитривалості та здатності витримувати значний техногенний прес, що робить його незамінним для створення захисних смуг та паркових зон.

Проте хронічний стрес, якого зазнають рослини в урбанізованому середовищі м. Дніпро, суттєво знижує їхній природний імунітет. Ослаблені екологічними факторами дерева стають уразливими до атаки різноманітних фітопатогенів – грибкових, бактеріальних та вірусних збудників хвороб. Життєдіяльність цих мікроорганізмів призводить до передчасного дефоліації, зниження декоративності, а в перспективі – до повної деградації та загибелі насаджень Acer tataricum, що завдає значних екологічних та економічних збитків міському господарству.

Попри загальну відомість клену татарського як відносно стійкої породи, комплексний патологічний стан його популяції на території Дніпра залишається недостатньо вивченим. Наявні наукові праці часто мають загальний характер і не враховують сучасну динаміку поширення фітопатогенів у специфічних мікрокліматичних зонах міста – від відносно чистих лісопаркових окраїн до критично перевантажених транспортних розв'язок та промислових зон правобережжя та лівобережжя. Це зумовлює гостру потребу в моніторингу та детальному аналізі мікробіоти, що паразитує на цій рослині.

РОЗДІЛ 1. БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ КЛЕНУ ТАТАРСЬКОГО (ACER TATARICUM L.)

1.1. Ботанічна характеристика

Acer tataricum (L), клен татарський – вид клена, поширений у Центральній та Південно-Східній Європі та помірній Азії, від Австрії та Туреччини, а також у деяких районах, з окремою популяцією у Східній Азії, у північному та центральному Китаї, Японії та на Далекому Сході Євразії (рис. 1.). Вид названий на честь татарських народів півдня Росії; назва дерева також часто пишеться з помилками як «Tartar» або «Tartarian» англійською мовою [1].

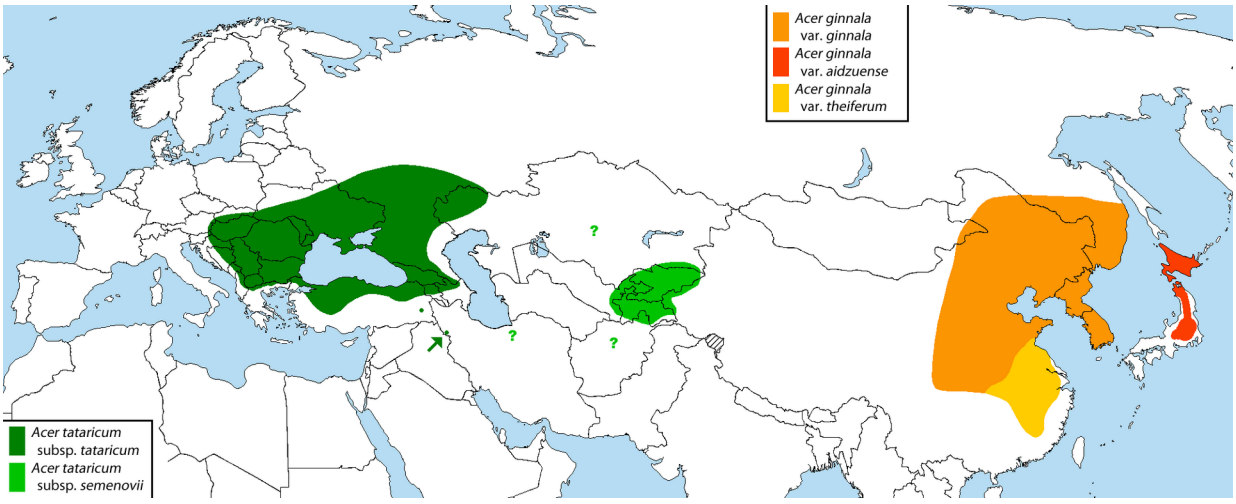


Рис. 1.1. Природний ареал клену татарського

Клен татарський – листопадний розлогий чагарник або невелике дерево, що виростає до 4–12 метрів заввишки, з коротким стовбуром діаметром до 20–50 сантиметрів та тонкими гілками. Кора тонка, блідо-коричнева та спочатку гладка, але у старих рослин стає неглибоко тріщинуватою. Кора гілок завжди гладка. Кора сіра і шорстка, з овальними або округлими сочевицями [2]. Невеликі зимові бруньки

мають від п'яти до десяти пар лусочок, що перекриваються, краї яких опушені.

Листя супротивне та просте, широкояйцеподібне, 4,5–10 сантиметрів завдовжки та 3–7 сантиметрів завширшки, безлопатеве або з трьома чи п'ятьма неглибокими лопатями, зверху матово-зелене; край листка грубо та нерівномірно зубчастий; черешок листка тонкий, часто рожевого відтінку, 2–5 сантиметрів завдовжки [3].

У зрілих екземплярів листова пластинка цільна або лопатева з двома меншими бічними лопатями, або крупнозубчаста (рис. 1.2.); молоде листя часто має від трьох до п'яти лопатей, аж до п'яти лопатей. Лопаті гострі або загострені. Край листа нерегулярно простий або зазвичай двічі пильчастий. Верхівка листа гостра або загострена, а основа листової пластинки серцеподібна, округла або усічена. Верхня поверхня листової пластинки гладка і світло-зелена, а нижня поверхня спочатку опушена вздовж жилок. Восени листя жовтіє або стає червонувато-оранжевим [4].

Квіти білувато-зелені, діаметром 5–8 міліметрів, утворюються у розлогих волотях навесні, коли листя розпускається. Плід – парна червонувата самара, довжиною 10–12 міліметрів з крилом 2–3 сантиметри, що дозріває наприкінці літа – початку осені [4].

Acer tataricum – однодомна рослина. Воно утворює верхівкові, дрібні, рясно квітучі волоті. Квітки з'являються трохи пізніше за листя. Відносно невеликі, функціонально одностатеві, черешкові, запашні квітки (у видів Acer) радіально-симетричні, п'ятичленові, з подвійною оцвітиною. Квітконіжки та черешок суцвіття залізисті.

П'ять жовтувато-зелених яйцевидних чашолистків довжиною від 1,5 до 2 мм густо опушені по краях. П'ять довгасто-яйцеподібних пелюсток білувато-зелені. Вісім тичинок мають гладкі нитки [5].



А. Зовнішній вигляд дорослого дерева



Б. Листок



В. Квіти



Г. Плоди



Д. Розріз стовбура



Є. Кора

Рис. 1.2. Біологічна характеристика клена татарського

Позатичинковий диск гладкий. Зав'язь густо чи рідко густо опушена. Стовпчик гладкий. Чоловічі квітки мають пестилод і до восьми тичинок, що злегка виступають, а жіночі квітки мають стамінодії з антеродами. Рубці на гілках білуваті або зелені [3].

В Україні період цвітіння посідає травень, а Китаї – з травня до червня [6].

Крилаті, дворозділні плоди (самари) мають довжину від 25 до 40 мм та ширину від 8 до 10 мм. Два крилаті, однонасінні мерикарпи розташовані під гострим кутом або майже паралельно один одному. Крила, спочатку покриті залізистим пухом, а потім позбавлені волосків, мають довжину від 2 до 3 см і спочатку червонуватий колір. Плоди дозрівають із вересня до жовтня [7].

Число хромосом дорівнює 2n = 26. [8]

Татарський клен зрідка використовується як зелені насадження в садах і парках Європи. У культурі більше 10 сортів, що відрізняються формою крони і листових пластинок, а також особливостями осіннього забарвлення. Частково інтродукований у східних регіонах Північної Америки [1].

Пізньої осені листя поїдається вівцями та козами. Серед інших видів клена найкраще поїдається плямистим оленем.

Дає медоносним бджолам нектар та пилок [7]. Пізніше цвітіння в більш теплу погоду, ніж гостролистий клен, дозволяє бджолам краще використовувати нектар. Медопродуктивність до 100 кг з одного гектара насаджень. Добове приріст контрольного вулика 1-2 кг.

Містить таніни та галову кислоту [9]. Плоди та квітки застосовуються в народній медицині при різноманітних діареях. Рослина рекомендується як в'яжучий протидизентерійний засіб.

Використовується в полізахисному лісорозведенні, меліоративних та озеленювальних насадженнях.

Клен татарський зазвичай росте на узліссях, серед чагарникових заростей, на схилах ярів, а в широколистяних лісах часто входить до складу підліску. У гірській місцевості його можна зустріти на висотах від 700 до 3000 метрів над рівнем моря [5].

Цей вид відзначається високою стійкістю до морозів і посухи. Він надає перевагу добре освітленим місцям, хоча здатний переносити й часткове затінення. Клен татарський витримує засолення ґрунтів, однак найкраще розвивається на родючих піщаних землях. Темпи росту помірні: щорічно дерево може додавати до 70 см у висоту та близько 50 см у ширину крони. Перші плоди з’являються приблизно на восьмому році життя [7].

Водночас це довговічна порода – окремі дерева живуть понад століття, а іноді досягають віку 300 років. Для рослини характерне активне утворення прикореневої поросл і. Крона добре переносить обрізування та легко піддається формуванню [3].

Цвітіння відбувається у травні–червні й триває від 13 до 25 днів, зазвичай пізніше, ніж у більшості інших видів кленів. Запилення здійснюють комахи, зокрема бджоли. Плоди достигають у серпні–жовтні, а насіння поширюється вітром. Насінню клена татарського властивий низький вміст крохмалю та підвищений вміст білків і жирів [10].

Для штучного вирощування рекомендується проводити стратифікацію насіння протягом 120–150 діб. Після такої підготовки його схожість становить 90–98 % і може зберігатися на цьому рівні до двох років. Крім насіннєвого способу розмноження, клен татарський здатний розмножуватися вегетативно: у природних умовах – кореневими паростками, а в культурі – живцями [10].

1.2. Систематика

Вид Клен татарський відноситься до роду Клен (Acer) підродини Конскокаштанові (Hippocastanoideae) сімейства Сапіндові (Sapindaceae) порядку Сапіндоцвіті (Sapindales).

Видова назва Acer tataricum вперше була опублікована Карлом Ліннеєм у Species Plantarum, 2, стор. 1054 [2]. Acer tataricum – єдиний вид у секції Ginnala Nakai у роді Acer [3]. Систематика непослідовна залежно від автора, тому деякі підвиди також вказані окремі види. Зрештою, це видовий комплекс, в якому гібридизація може відбуватися в штучних умовах або в невеликих областях перекриття, хоча підвиди зазвичай географічно розділені. Зокрема, підвид Acer tataricum subsp. ginnala часто розглядається як окремий вид; див. також амурський клен.

У 1996 році Піт К. де Йонг дав ширше визначення Acer tataricum і виділив чотири підвиди:

- *Acer tataricum* L. subsp. *tataricum*

Номінативна форма зустрічається у Східно-Центральній Європі (Австрія, Угорщина), Південно-Східній Європі (Румунія, Сербія), Східній Європі (Україна (включаючи Крим), Південна Росія), Грузії, Вірменії, Східній Туреччині та Азербайджані.

- *Acer tataricum* subsp. *aidzuense* (FRANCH.) PC DE JONG, Syn.: Acer *tataricum* var. *Aidzuense* FRANCH.

У цього підвиду, якщо присутні бічні лопаті, їх кількість значно збільшується на додаток до двох основних. Він зустрічається на чотирьох головних островах Японії.

- *Acer tataricum subsp. Ginnala (Maxim.) Wesmaer, Syn.: Acer ginnala Maxim.)*

Амурський клен має більш дрібне листя, розміром від 4 до 8 см, з додатковими лопатями на центральній та бічних сторонах; однак у деяких

підвидів листя не лопатеве. Краї листя гостро і грубо двічі зазубрені. Черешок, довжиною від 1,5 до 4 см, довше, ніж у Acer tataricum subsp. tataricum, верхня поверхня глянсова, темно-зелена, а нижня - світло-зелена [3]. Осіннє листя має більш виражений кармінно-червоний колір. Жовтувато-білі квітки зібрані в гроно приблизно по 50 штук. Крила паралельні або розташовані під гострим кутом та липкі. Цей підвид зустрічається в Східному Сибіру, на південному сході Монголії, в Китаї (Ганьсу, Хебей, Хейлунцзян, Хенань, Цзилінь, Ляонін, Внутрішня Монголія, Шеньсі, Шаньсі), Північній Кореї та Японії.

- *Acer tataricum subsp. semenovii (Regel & Herder) Pax*

Семенівський клен значно менший за розміром, досягаючи максимальної висоти 5 метрів. Його листя також менше, ніж у інших підвидів, розміром від 1 до 3 (до 5) см від 1 до 3 см, але злегка шкірясте. Цвіте вже у квітні, а плоди великі (від 3 до 3,5 см) [3]. Зустрічається в північному Ірані, Туркменістані, північному Афганістані, Таджикистані, Киргизстані, Тянь-Шані та південно-східному Казахстані (район озера Балхаш). Там він росте в степових місцеперебуваннях, відкритих лісах, долинах і гравійних схилах на висотах від 700 до 3000 метрів.

- *Acer tataricum* subsp. *theiferum* (W.P.FANG) Y.S.CHEN & P.C. DE JONG

У цієї рослини дуже тонке листя, нижня сторона якого покрита волосками [3]. Цей підвид зустрічається в південній частині свого ареалу в Китаї: Аньхой, північна частина Гуандуна, Хенань, Хубей, Цзянсу, Цзянсі, Шеньсі та Чжецзян. Його таксономічний статус незрозумілий; він також вважається синонімом підвиду Acer tataricum subsp. ginnala.

РОЗДІЛ 2. ЕКОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ БОРОШНИСТОЇ РОСИ

2.1. Біологічна характеристика

Борошниста роса є поширеним грибковим захворюванням, яке уражає багато видів рослин. Її розвиток спричиняють різні види сумчастих грибів із порядку Erysiphales.

Цю хворобу легко розпізнати завдяки характерним зовнішнім проявам. На листках і стеблах заражених рослин утворюється білий борошнистий наліт (рис. 2.1.). З часом грибниця швидко розростається та може вкривати значну частину або всю поверхню листків. Найчастіше ураження спостерігається на нижньому листі, проте ознаки борошнистої роси можуть з’являтися на будь-яких надземних органах рослини.



Рис. 2.1. Листя клена татарського уражені борошнистою росою

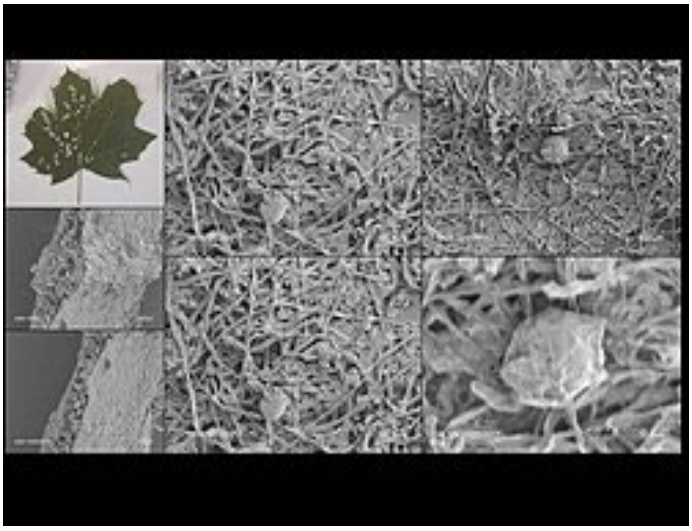
У міру розвитку захворювання уражені ділянки поступово збільшуються в розмірах і стають щільнішими через інтенсивне утворення безстатевих спор. Унаслідок цього борошнистий наліт поширюється по всій рослині, охоплюючи її як у верхньому, так і в нижньому напрямках (рис. 2.2.).



А



Б



Г

Рис.2.2. Борошниста роса на листку: А — загальний вигляд у натуральну величину; Б — фрагмент ураженої поверхні при збільшенні у 8 разів (×8); В — структура борошнистої роси на листку клена, досліджена за допомогою сканувального електронного мікроскопа

Борошниста роса найкраще розвивається в умовах підвищеної вологості та помірних температур. Саме тому теплиці, де підтримується теплий і вологий мікроклімат, є сприятливим середовищем для поширення цього захворювання. У результаті хвороба може завдавати значних збитків сільськогосподарським і декоративним культурам, які вирощуються в закритому ґрунті [11].

У практиці рослинництва боротьба зі збудником здійснюється за допомогою хімічних препаратів, біологічних засобів захисту та використання сортів із генетично зумовленою стійкістю. Своєчасне виявлення борошнистої роси та застосування ефективних заходів контролю є важливими, оскільки захворювання здатне суттєво знижувати врожайність багатьох сільськогосподарських культур.

Гриби, що спричиняють борошнисту росу, можуть розмножуватися як статевим, так і безстатевим шляхом. Статеве розмноження відбувається через утворення хазмотеціїв (раніше - клейстотеціїв) - особливих плодових тіл аскоміцетних грибів, у яких відбувається генетична рекомбінація. Хазмотеції належать до аскокарпів - спеціалізованих структур грибів відділу Ascomycota. Усередині кожного аскокарпа містяться аски з аскоспорами. Для успішного зараження рослини-господаря гриби борошнистої роси повинні бути добре пристосованими до конкретного виду рослин.

За сприятливих умов аскоспори дозрівають, вивільняються та стають джерелом нових інфекцій [11]. Водночас вимоги до їх дозрівання можуть відрізнятися залежно від виду гриба. Під час безстатевого розмноження нащадки є генетично ідентичними материнському організму [12]. Саме цей спосіб є основним механізмом швидкого поширення борошнистої роси, зокрема на посівах пшениці та ячменю.

Статеве розмноження, своєю чергою, забезпечує формування стійких зимуючих спор, що розвиваються всередині хазмотеціїв. Такі спори мають темне забарвлення, яке захищає їх від ультрафіолетового випромінювання, а також товсті міцні оболонки, що підвищують їхню стійкість до низьких температур і механічних пошкоджень. Завдяки цим особливостям вони здатні успішно переживати зимовий період, а навесні проростають і стають джерелом нового циклу зараження рослин [13].

Репарація невідповідностей ДНК (MMR, Mismatch Repair) являє собою спеціалізовану ферментативну систему, яка забезпечує виявлення та виправлення помилок, що виникають під час реплікації та рекомбінації ДНК. До таких помилок належать неправильні вставки, делеції та некоректне включення азотистих основ у молекулу ДНК [17]. Крім того, система MMR бере участь у відновленні окремих типів пошкоджень генетичного матеріалу.

Дослідження показали, що у чотирьох близькоспоріднених видів рослинних паразитів із групи грибів борошнистої роси було втрачено від 5 до 21 гена системи MMR із загальної кількості 48–52 генів, характерних для більшості представників аскоміцетів [14].

Встановлено, що види борошнистої роси з більшою втратою генів MMR характеризуються підвищеною частотою виникнення різних типів мутацій [15]. Це свідчить про те, що дефіцит генів, відповідальних за підтримання точності реплікації ДНК, може призводити до прискорення накопичення генетичних змін, що, своєю чергою, сприяє швидшій еволюції геномів і зростанню еволюційного різноманіття цих організмів.

2.2. Вплив на деревні рослини

Ураження кленів фітопатогенними грибами негативно позначається не лише на їхніх декоративних якостях, а й на загальному фізіологічному стані. Зокрема, порушуються процеси фотосинтезу та транспірації, що може спричиняти всихання окремих гілок і, в окремих випадках, загибель дерева [16].

Серед найпоширеніших захворювань клена гостролистого особливе місце займає борошниста роса, збудником якої є паразитичний гриб Sawadaea bicornis (Wallroth) Miyabe, 1937. Цей патоген уражає рослини різного віку — від молодих сіянців до зрілих дерев. Його шкідливий вплив проявляється двома шляхами: безпосередньо через використання поживних речовин рослини-господаря та опосередковано через пригнічення

фотосинтетичної активності внаслідок утворення на поверхні листків щільного шару міцелію [24].

Інтенсивність розвитку хвороби значною мірою залежить від віку листків і тривалості інфекційного процесу. Найбільш сприйнятливими до зараження є молоді листки та верхівкові пагони, тому первинні симптоми зазвичай з'являються у верхній частині крони. За високого ступеня ураження грибний наліт може повністю вкривати листя та пагони, викликаючи їх пожовтіння, засихання і відмирання. Особливо небезпечною борошниста роса є для молодих рослин, оскільки здатна пригнічувати їх ріст, зменшувати зимостійкість, спричиняти передчасне опадання листя та загальне виснаження організму [17].

Для оцінювання впливу стресових факторів на рослини та визначення їх адаптивного потенціалу широко використовують метод флуоресценції хлорофілу. Цей підхід характеризується високою чутливістю, швидкістю виконання та неінвазивністю, що робить його зручним для польових досліджень [18]. Метод успішно застосовували для аналізу фізіологічного стану міських насаджень Acer platanoides. Було встановлено, що дерева, які ростуть в урбанізованих умовах, мають нижчі показники максимального квантового виходу фотосистеми II (Fv/Fm) та швидкості транспорту електронів (ETR) порівняно з рослинами із сільських екосистем [17].

Адаптивна реакція A. platanoides формується під впливом різноманітних стресових чинників, серед яких посуха, підвищені температури, засолення ґрунту, нестача мінерального живлення та забруднення середовища важкими металами.

Фотосинтез є одним із ключових процесів життєдіяльності рослин і тісно пов'язаний із механізмами імунного захисту. Наукові дослідження свідчать про існування складної взаємодії між цими системами: фотосинтетичний апарат забезпечує енергетичні та пластичні ресурси для реалізації захисних реакцій, тоді як активація імунної відповіді може супроводжуватися пригніченням фотосинтетичної активності [18].

Розвиток інфекції супроводжується суттєвими змінами фізіологічних і біохімічних показників рослини. Зокрема, змінюються параметри чистого фотосинтезу (Pn), продихової провідності (Gs), внутрішньоклітинної концентрації CO_2 (Ci), активність антиоксидантних ферментів, таких як супероксиддисмутаза (SOD) і каталаза (CAT), а також рівні сигнальних сполук, включаючи перекис водню (H_2O_2) та фітогормони. Крім того, інфекція впливає на експресію генів, пов'язаних із функціонуванням фотосинтетичного апарату.

Зменшення інтенсивності фотосинтезу безпосередньо пов'язане зі ступенем стійкості рослини до патогена, тривалістю захворювання та локалізацією осередків інфекції [19]. Листки, уражені S. bicornis, характеризуються порушенням роботи циклу трикарбонових кислот, зниженням ефективності електронного транспорту та зменшенням вмісту хлорофілу. Також спостерігається зниження показників Fv/Fm, ETR і фактичної фотохімічної ефективності фотосистеми II [20].

Наслідком таких змін є зменшення інтенсивності фіксації вуглецю та порушення транспорту асимілятів до інших органів рослини. Основними причинами цього вважають зниження швидкості перенесення електронів і максимальної інтенсивності карбоксилювання.

Дослідження хлоропластів, виділених з інфікованого листя, показали зниження швидкості транспорту електронів від води до $NADP^+$, а також пригнічення нециклічного фотофосфорилювання, що супроводжується зменшенням синтезу АТФ. Одночасно відзначається накопичення амінокислот і порушення активності ферментів фосфоенолпіруваткарбоксилази та малатдегідрогенази, які відіграють важливу роль у синтезі первинних органічних сполук [20].

2.3. Засоби контролю

Для обмеження поширення борошнистої роси в аграрному виробництві застосовують комплексний підхід, який поєднує використання фунгіцидів, вирощування стійких сортів та дотримання належних агротехнічних заходів. Значна частина культурних рослин має сорти з підвищеною резистентністю до цього захворювання, що дозволяє суттєво зменшити втрати врожаю.

Важливим елементом профілактики є створення умов, несприятливих для розвитку патогена. Зокрема, зниження вологості повітря навколо рослин шляхом забезпечення достатньої відстані між насадженнями та проведення своєчасного проріджування або обрізування сприяє кращій циркуляції повітря і стримує розвиток хвороби.

Одним із найефективніших засобів боротьби залишаються традиційні фунгіциди [21]. Їх рекомендується застосовувати одразу після виявлення перших симптомів захворювання. Для забезпечення стабільного захисного ефекту обробки необхідно проводити регулярно протягом усього періоду ризику зараження [22]. Високу ефективність проти борошнистої роси продемонстрували препарати на основі тріадимефону та пропіконазолу. Також успішно використовують гексаконазол, міклобутаніл і пенконазол [22].

Поряд із традиційними фунгіцидами застосовують і низку альтернативних засобів захисту, які відрізняються механізмом дії та можуть використовуватися в інтегрованих системах захисту рослин [23]. До найбільш ефективних належать молоко, елементарна сірка, бікарбонат калію, препарати на основі металевих солей та різноманітні рослинні олії.

Фунгіциди, що містять солі металів, потребують регулярного внесення протягом вегетаційного періоду аж до збору врожаю. Сірку доцільно використовувати профілактично, оскільки вона пригнічує проростання спор грибів і запобігає розвитку інфекції. Сульфат міді також характеризується

високою фунгіцидною активністю та дозволений до використання в органічному землеробстві. Проте його надмірне застосування може спричиняти фітотоксичний ефект, який частково нейтралізується додаванням вапна.

Серед природних засобів захисту значну увагу привертає олія німу, яка порушує обмінні процеси грибів і пригнічує спороутворення. Ефективною також вважається суміш сірки з риб'ячим жиром і кунжутною олією [17].

Одним із найпоширеніших біологічних засобів боротьби з борошнистою росою є молоко. Його зазвичай розводять водою у співвідношенні 1:10 та використовують для обприскування рослин при появі перших ознак захворювання або з профілактичною метою. Регулярне щотижневе застосування такого розчину часто дозволяє ефективно стримувати розвиток інфекції або повністю її усувати. Дослідження показали, що за ефективністю молочні обробки можуть бути співставними з окремими традиційними фунгіцидами [23] і навіть перевершувати такі препарати, як беноміл та фенаримол за певних концентрацій. Позитивні результати отримано при захисті кабачків, гарбузів, винограду та троянд. Вважається, що один із механізмів дії пов'язаний зі здатністю білків молочної сироватки під впливом сонячного випромінювання утворювати активні форми кисню, які пошкоджують клітини патогена [17].

Для контролю борошнистої роси також використовують розчини на основі бікарбонату натрію (харчової соди) у поєднанні з рослинними або мінеральними оліями. Однак ефективність таких сумішей часто є нестабільною та залежить від умов застосування [24]. Хоча лабораторні дослідження підтверджують здатність бікарбонату натрію пригнічувати ріст грибів, практичне використання лише соди та води зазвичай не забезпечує надійного контролю хвороби. Крім того, надлишок натрію може негативно впливати на рослини.

Натомість бікарбонат калію вважається ефективним і відносно безпечним фунгіцидом для боротьби з борошнистою росою та паршею яблуні [24].

Ще одним перспективним методом є використання розчинів силікату кальцію. Кремній підвищує стійкість рослин до грибкових інфекцій, сприяючи зміцненню клітинних стінок, формуванню калозних відкладень і сосочків, а також перешкоджаючи проникненню гаусторій патогена. Завдяки цьому епідермальні клітини, зокрема у пшениці, стають менш сприйнятливими до зараження борошнистою росою.

Сучасні підходи до захисту рослин все більше орієнтуються на використання генетично обумовленої стійкості. Одним із добре вивчених прикладів є алель Pm3, який забезпечує ефективний захист рослин-господарів від збудників борошнистої роси [25].

Подальший розвиток методів селекції пов’язаний із використанням технологій геномного редагування. Так, у 2014 році було продемонстровано можливість формування стійкості до борошнистої роси у гексаплоїдної пшениці шляхом внесення цільових мутацій за допомогою систем CRISPR і TALENs, що відкриває нові перспективи для створення високостійких сортів сільськогосподарських культур [17].

РОЗДІЛ 3. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Польові дослідження

Дослідження виконувалися протягом вегетаційного періоду 2025 року в межах міста Дніпро. Кліматичні умови регіону характеризуються вираженою континентальністю, що проявляється у частих сезонних посухах, високих літніх температурах та суховіях. Середньорічна кількість опадів становить близько 472 мм, однак у посушливі роки цей показник може знижуватися до 250 мм. Водночас річне випаровування перевищує обсяг атмосферних опадів у 2–3 рази. За таких умов деревні рослини перебувають у стані екологічної напруги, що зумовлює їхню підвищену чутливість до коливань кліматичних чинників та впливу антропогенного забруднення навколишнього середовища.

У межах міста розташований Ботанічний сад Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (рис. 3.1.), заснований у 1931 році (48°26′ пн. ш., 35°02′ сх. д.; 127 м над рівнем моря). На його території культивується клен татарський (Acer tataricum L.) - вид, природний ареал якого охоплює, зокрема, степову зону України.



Рис. 3.1. Ботанічний сад Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Вимірювання впливу патогену на процеси фотосинтезу здійснювали приладом FLS-10 (біосенсор розроблений у Інституті кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України) (рис. 3.2.).



Рис. 3.2. Прилад FLS-10

Для аналізу кривих індукції флуоресценції хлорофілу (кривих Каутського) використовували основні діагностичні параметри:

F_0 - початковий рівень флуоресценції після початку освітлення;

Fp - значення флуоресценції на стадії «плато»;

Fm - максимальний рівень флуоресценції;

Fst - стаціонарне значення флуоресценції після адаптації листка до світла.

Крім безпосередньо виміряних показників, розраховували низку похідних параметрів, що характеризують функціональний стан фотосинтетичного апарату.

Зокрема:

Fv = Fm – Fo визначали як змінну флуоресценцію хлорофілу;

Fv/Fm використовували для оцінки максимальної квантової ефективності фотосистеми II (PSII);

показник Fv/Fo характеризував максимальний початковий вихід фотохімічних процесів у фотосистемі II;

коефіцієнт (Fm – Fst)/Fst відображав ефективність перебігу фотохімічних реакцій;

співвідношення (Fp – Fo)/Fv застосовували для визначення частки QA-акцепторів у реакційних центрах фотосистеми II, які не беруть участі у відновлювальних процесах.

Статистичні порівняння між пошкодженим та непошкодженим листям проводилися окремо для кожного параметра флуоресценції хлорофілу та стану навколишнього середовища за допомогою лінійних моделей зі змішаними ефектами. Стан листя (пошкоджений проти непошкодженого) розглядався як фіксований ефект, тоді як ідентичність дерева включалася як випадковий перетин, щоб врахувати незалежність серед листя, відібраного з одного дерева. Моделі підбиралися з використанням обмеженої максимальної правдоподібності, а значущість стану листя оцінювалася за допомогою дисперсійного аналізу з наближенням Саттертвейта. Для кожного параметра було вилучено оцінену середню різницю (Непошкоджений - Пошкоджений) ± SE, t-значення, F-значення, p-значення та граничний R^2.

3.2. Техніка безпеки у Ботанічному саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

Під час проведення науково-дослідних робіт на території Ботанічного саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара необхідно суворо дотримуватися вимог техніки безпеки та

правил внутрішнього розпорядку. Перед початком роботи всі учасники досліджень повинні пройти інструктаж з охорони праці та ознайомитися з особливостями території, маршрутами пересування й потенційними небезпеками.

Під час роботи на дослідних ділянках слід використовувати зручний закритий одяг і взуття, які забезпечують захист від механічних пошкоджень, укусів комах та несприятливих погодних умов. У період високої сонячної активності рекомендується користуватися головними уборами та засобами захисту шкіри від ультрафіолетового випромінювання.

Пересування територією ботанічного саду дозволяється лише спеціально відведеними доріжками та маршрутами. Забороняється самовільно заходити до службових приміщень, теплиць, господарських зон або на експериментальні ділянки без відповідного дозволу працівників установи. Особливу обережність необхідно проявляти поблизу водойм, схилів та інших потенційно небезпечних об’єктів.

Під час проведення польових досліджень забороняється пошкоджувати рослини, ламати гілки, зривати листя, квіти чи плоди без наукової необхідності та відповідного погодження. Відбір рослинного матеріалу повинен здійснюватися лише в межах затвердженої методики дослідження та з дотриманням вимог щодо збереження колекційних насаджень.

При використанні ріжучих інструментів, секаторів, ножів або іншого обладнання необхідно дотримуватися правил безпечної роботи. Інструменти повинні бути справними та використовуватися виключно за призначенням. Після завершення робіт їх необхідно очистити, продезінфікувати за потреби та повернути у визначене місце зберігання.

У разі роботи з хімічними речовинами, добривами або засобами захисту рослин необхідно користуватися засобами індивідуального захисту, зокрема рукавичками, захисними окулярами та респіраторами.

Роботи з потенційно небезпечними препаратами слід виконувати відповідно до чинних інструкцій та під наглядом відповідальних осіб.

У випадку виникнення аварійної ситуації, травмування, погіршення самопочуття або виявлення небезпечних факторів необхідно негайно припинити роботу та повідомити керівника досліджень або працівників ботанічного саду. Дотримання правил техніки безпеки є обов’язковою умовою проведення наукових досліджень і сприяє збереженню здоров’я працівників, студентів та унікальних рослинних колекцій ботанічного саду.

РОЗДІЛ 4. ОСОБЛИВОСТІ УРАЖЕННЯ БОРОШНИСТОЮ РОСОЮ КЛЕНУ ТАТАРСЬКОГО В УМОВАХ БОТАНІЧНОГО САДУ ДНУ

Кліматичні зміни, що спричиняють аридизацію, негативно впливають на умови зростання дерев, обмежуючи їхню здатність виконувати екологічні та соціальні функції [26]. Важливим аспектом догляду за міськими зеленими насадженнями є якісна оцінка реакції дерев на екстремальні кліматичні умови та пов'язані з ними зміни в місцях зростання [27].

Окрім того, міське середовище створює широкий спектр стресових факторів, які мають серйозний негативний вплив на рослинність. Дерева, що зростають в умовах урбанізованого простору, зазнають впливу низки несприятливих чинників: забруднення повітря вихлопними газами, накопичення в ґрунті важких металів, специфічної аеродинаміки міста [28]. Це призводить до виснаження рослинних організмів, роблячи їх більш вразливими до ураження хворобами (вірусними, бактеріальними, грибковими) та пошкодження шкідниками.

Попри це, міські екосистеми потребують збагачення насаджень і розширення їхнього видового складу. У таких умовах догляд за зеленими насадженнями має включати сучасні методи експрес-діагностики стану рослин, одним із яких є метод індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ). Метод ІФХ є важливим інструментом для моніторингу фізіологічного стану рослин, що ростуть в умовах стресу навколишнього середовища [29].

Серед листопадних деревних порід помірної зони клени являються одними з найцінніших у зеленому будівництві, лісовому господарстві, лісових насадженнях. В умовах міської забудови рослини роду Acer L. широко використовуються для створення паркових та лісопаркових фітоценозів, в групових та поодиноких посадках, в озелененні міських площ, проспектів, бульварів.

Завдяки своїм високим декоративним якостям із сезонним аспектом та наявності масивної крони, що здатна виконувати санітарно-гігієнічну роль, адсорбуючи поверхнею листків пил та аерогенні полютанти клени широко залучаються для озеленення промислових, селітебних та рекреаційних зон.

Видовий склад кленів у насадженнях різного функціонального призначення, а особливо на промислових територіях, на сьогодні дуже обмежений. Одним із найпоширеніших в озелененні міст видом роду Acer в Україні є клен татарський. Це морозостійка, тіньовитривала рослина, що добре переносить посуху та засоленість ґрунту, а також є хорошим медоносом. Однак, в умовах міста, як і інші види роду Acer, клен татарський є більш вразливими до патогенів. Ураження фітопатогенними грибами знижує декоративність кленів, а також призводить до порушення фотосинтезуючих та транспіраційних процесів, викликають всихання та відмирання як окремих гілок так і дерев загалом.

Однією з найпоширеніших хвороб, що вражає молоді проростки і дорослі рослини роду Acer, є борошниста роса, спричинена паразитним грибом Sawadaea bicornis (Wallroth) Miyabe 1937. Вплив борошнистої роси на рівні листка сильно залежить від часу і тяжкості зараження, оскільки сприйнятливість листя до фітопатогену залежить від його віку.

Більш уразливі для ураження S. bicornis молоді листки і верхівки пагонів, тому, спочатку, борошнисту росу можна зустріти саме на верхівках рослин. При сильному ураженні нальотом покриваються всі листки і стебла, після чого вони жовтіють і засихають.

Борошниста роса є однією з найбільш небезпечних захворювань рослин, особливо на ранніх етапах онтогенезу, оскільки здатна зупинити ріст проростків, суттєво погіршити зимівлю, викликати повне опадання листя і істотно виснажити рослину [30].

Життєздатність рослин безпосередньо залежить від фотосинтезу, тоді як їхня здатність пристосовуватися до навколишнього середовища визначається ефективністю імунної системи. Сучасні наукові дані підтверджують існування складного двостороннього зв'язку між цими процесами: фотосинтетичний апарат постачає енергію та метаболіти для активації імунітету, а імунні реакції, своєю чергою, регулюють інтенсивність фотосинтезу [31].

Для моніторингу стану фотосинтетичної системи та оцінки негативного впливу екологічних факторів сьогодні застосовують новітні експрес-методи. Їхня головна цінність полягає у високій чутливості, що дозволяє фіксувати мінімальні функціональні порушення безпосередньо в польових умовах за короткий проміжок часу.

Одним із таких підходів є метод індукції флуоресценції хлорофілу, який базується на реєстрації світлового випромінювання листків після їхньої короткочасної адаптації до темряви. Завдяки своїй точності, цей метод дає змогу оперативно виявляти стресові зміни в організмі рослин та оцінювати їхній потенціал до відновлення. Це робить його незамінним інструментом для масштабних екологічних моніторингів, а також для практичного застосування в агрономії, лісівництві, садівництві та арбористиці [32].

Непошкоджене листя дерев показало вищі значення основних параметрів флуоресценції хлорофілу, включаючи Fo, Fm, Fp, Fst та Fv, а також співвідношення Fv/Fo та Fv/Fm, ніж пошкоджене листя (рис. 4.1). Найбільш виражені відмінності між двома групами спостерігалися для Fm, Fp, Fst та Fv. Натомість, індекси (Fm–Fst)/Fst та (Fp–Fo)/Fv змінювалися лише незначно та демонстрували суттєве перекриття між пошкодженим та непошкодженим листям.

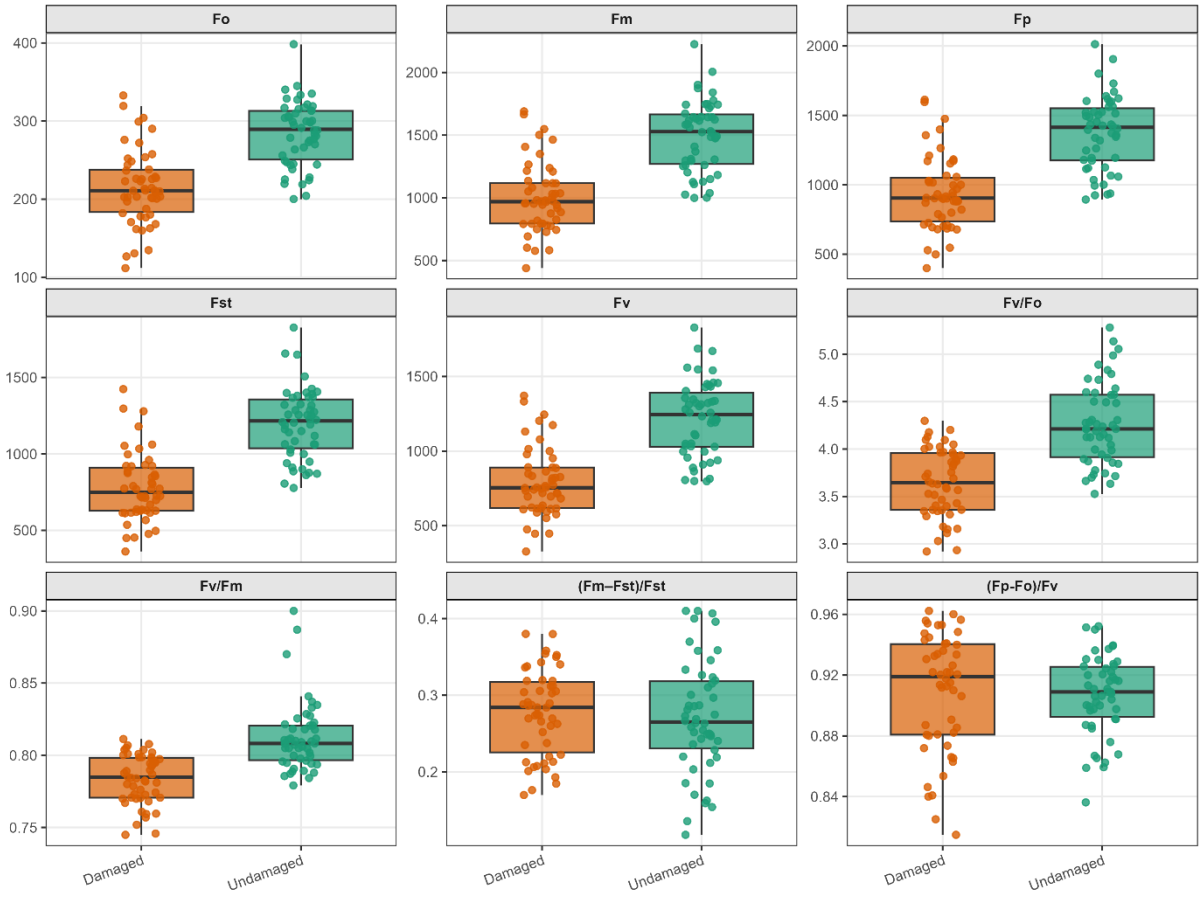


Рис. 4.1. Варіація параметрів флуоресценції хлорофілу між пошкодженим та непошкодженим листям дерев

Статистичний аналіз показав значний вплив пошкодження листя на Fo, Fm, Fp, Fst, Fv, Fv/Fo та Fv/Fm (усі $p < 0,001$) (Таб. 4.1). Позитивні середні відмінності (Непошкоджене − Пошкоджене) вказували на те, що ці параметри були вищими у непошкодженому листі, ніж у пошкодженому. Найбільш сильний вплив спостерігався для Fst, Fv та Fm, що відображається у найвищих значеннях F та коефіцієнтах детермінації (R^2 = 0,45, 0,44 та 0,43 відповідно). Натомість, для отриманих індексів (Fm − Fst)/Fst та (Fp − Fo)/Fv значного впливу пошкодження листя не виявлено (p = 0,66 та 0,76 відповідно).

Дещо вищі значення температури були пов'язані з непошкодженим листям, тоді як пошкоджене листя, як правило, виникало за дещо вищої вологості (рис. 4.2).

Таблиця 4.1.

Порівняння параметрів флуоресценції хлорофілу між непошкодженим та пошкодженим листям дерев

Параметр	(Непошкоджені–Пошкоджені)±SE	*t*-value	*F*-value	*p*-value	R^2
Fo	69.72±7.92	8.81	77.56	<0.001	0.37
Fm	493.96±50.95	9.70	94.01	<0.001	0.43
Fp	436.60±48.38	9.02	81.43	<0.001	0.40
Fst	416.20±41.26	10.09	101.76	<0.001	0.45
Fv	428.84±44.03	9.74	94.84	<0.001	0.44
Fv/Fo	0.62±0.07	8.36	69.87	<0.001	0.37
Fv/Fm	0.03±0.00	7.18	51.48	<0.001	0.32
(Fm–Fst)/Fst	–0.01±0.01	–0.44	0.19	0.66	0.00
(Fp–Fo)/Fv	–0.00±0.01	–0.31	0.10	0.76	0.00

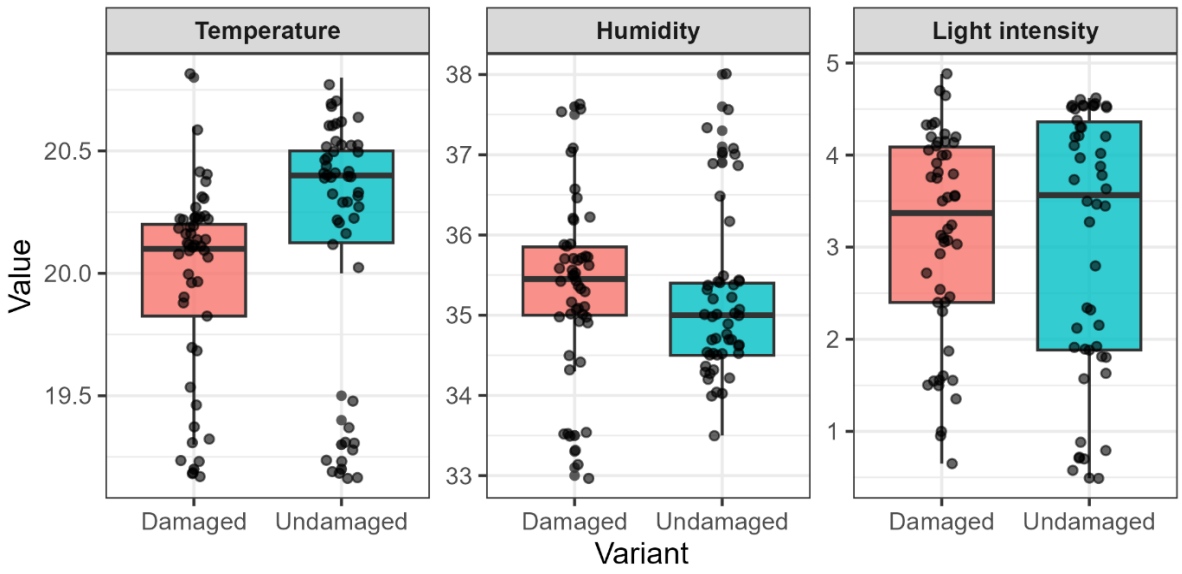


Рис. 4.2. Різниця в параметрах температури, вологості та інтенсивності освітлення між пошкодженим та неушкодженим листям дерев

Інтенсивність світла значно варіювалася в обох групах і демонструвала суттєве перекриття, хоча непошкоджене листя характеризувалося дещо вищою медіаною та ширшим діапазоном

значень. Загалом, розподіли параметрів навколишнього середовища значно перекривалися між пошкодженим і непошкодженим листям, що вказує лише на помірну різницю між двома станами листя.

Статистичний аналіз визначив температуру як єдину змінну навколишнього середовища, суттєво пов'язану зі станом листя (Табл.4.2).

Таблиця 4.2.

Порівняння параметрів температури, вологості та інтенсивності світла між непошкодженим та пошкодженим листям дерев

Параметр	(Непошкоджені–Пошкоджені)±SE	*t*-value	*F*-value	*p*-value	R^2
Температура	0.19±0.04	4.54	20.59	<0.001	0.04
Вологість	–0.15±0.15	–1.00	1.00	0.32	0.00
Інтенсивність освітлення	–0.08±0.15	–0.53	0.28	0.60	0.00

Позитивна середня різниця (Непошкоджене - Пошкоджене = 0,19 ± 0,04) вказувала на дещо вищі температури для непошкодженого листя, і цей ефект був значним ($p < 0,001$), хоча пояснена дисперсія була низькою ($R^2 = 0,04$). Натомість, вологість та інтенсивність світла суттєво не зазнали впливу стану листя ($p = 0,32$ та 0,60 відповідно), що вказує на суттєве перекриття між пошкодженим та непошкодженим листям за цими параметрами.

РОЗДІЛ 5. ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ БОРОШНИСТОЇ РОСИ НА ПРОЦЕСИ ФОТОСИНТЕЗУ КЛЕНУ ТАТАРСЬКОГО

Протягом останнього десятиліття дослідження дедалі частіше зосереджуються на використанні змін параметрів флуоресценції хлорофілу (CF) для інтерпретації фізіологічних механізмів у рослин. Метод CF застосовується не лише для визначення реакцій рослин на стресові чинники, але й як індикатор зворотного зв'язку при розробці стратегій їх пом’якшення.

У результаті проведеного аналізу змін CF встановлено вплив біотрофного патогена S. bicornis на окремі показники CFI листків A. tataricum, а також на коефіцієнти, що характеризують перебіг світлових фаз фотосинтезу та ефективність фотохімічних процесів, які забезпечують темнові фази засвоєння енергії світла. Отримані результати свідчать про негативний вплив інфекції борошнистою росою на фотосинтетичну активність клена татарського.

В умовах біотичного стресу засвоєння CO_2 рослинами суттєво змінюється внаслідок патогенної інфекції, незалежно від способу життя збудника [33]. Біотрофні патогени ростуть і живляться живими рослинними тканинами, колонізуючи клітини за допомогою механізмів, що пригнічують захисні реакції рослини. Така стратегія, відома як облігатний паразитизм, передбачає встановлення молекулярних і фізіологічних взаємодій із клітиною-господарем, що забезпечує патоген енергією для росту.

Під час взаємодії рослини з патогеном уражені рослини демонструють зниження асиміляції CO_2, динамічні зміни продихів (зокрема їх закриття), хронічне пригнічення фотосистем, підвищену дисипацію енергії у вигляді флуоресценції хлорофілу a (нефотохімічні процеси), зміни вмісту фотосинтетичних пігментів, структурні

пошкодження хлоропластів, зменшення індексу площі листка, порушення співвідношення «джерело–поглинач», а також зміни у профілях експресії генів, білків і метаболітів, пов'язаних із фотосинтезом. Патогенна інфекція листкової тканини знижує провідність світла через пошкодження клітин, що негативно впливає на фотосинтетичну активність і спричиняє формування хлоротичних та некротичних зон [34]. Зокрема, у випадку біотрофних грибів, таких як Hemileiavastatrix та Austropucciniapsidii, що уражують відповідно каву та евкаліпт, після прояву симптомів зафіксовано зниження асиміляції CO_2 на 20–50%. Одночасно відзначено суттєве пригнічення продихової провідності та швидкості транспірації на 30–50% у листках уражених рослин [35].

Результати цього дослідження також свідчать про значне зниження параметрів Fo та Fm індукції флуоресценції хлорофілу в листках клена татарського, покритих міцелієм S. bicornis на 50% або 75%. Зменшення параметра Fv, що визначається як різниця між Fm та Fo, пов'язане з порушенням трансформації енергії у фотосистемі II, а також із частковим закриттям реакційних центрів.

Це призводить до фрагментованого порушення їх функціонування у процесі перетворення світлової енергії на хімічний потенціал [36], що вказує на зниження фотосинтетичної компетентності на одиницю хлорофілу та, відповідно, на зменшення активності PSII.

Дослідження, спрямовані на аналіз розсіювання енергії за допомогою CF, дозволили краще зрозуміти фізіологічні процеси, що відбуваються як на безсимптомній, так і на симптоматичній стадіях розвитку хвороби. Відомо, що індекс Fv/Fm є одним із найбільш поширених параметрів флуоресценції хлорофілу a для оцінки рівня стресу, спричиненого абіотичними та біотичними чинниками [37].

У нашому дослідженні біотичний стрес, індукований борошнистою росою, призвів до істотного зниження цього показника. У нормальних умовах значення Fv/Fm для здорового листя становить близько 0,80–0,83,

тоді як його зниження свідчить про пошкодження частини реакційних центрів PSII, що спричиняє фотоінгібіцію фотосинтетичного апарату та часто супроводжується розвитком оксидативного стресу. Таким чином, параметр Fv/Fm є надійним індикатором фотохімічної активності та загального фізіологічного стану рослин. У фітопатології його застосування довело ефективність для оцінювання ступеня пошкодження фотосинтетичного апарату залежно від типу патогена [38].

Ще одним важливим показником ефективності PSII є максимальний квантовий вихід фотолізу води –Fv/Fo. Цей параметр є більш чутливим до стресових впливів, оскільки нормується за мінімальною флуоресценцією (Fo), а не за максимальною (Fm), як у випадку Fv/Fm. Зниження Fm та підвищення Fo зумовлюють істотні зміни Fv/Fo, навіть тоді, коли варіації Fv/Fm є менш вираженими.

Коефіцієнт ефективності темнових фотохімічних процесів (Fm–Fst)/Fst також є важливим показником функціонального стану листків. Він відображає рівень гасіння флуоресценції, що формується під впливом як фотохімічних процесів (фіксація CO_2), так і нефотохімічних механізмів (теплова дисипація енергії збуджених молекул хлорофілу). Параметр (Fm–Fst)/Fst тісно корелює з активністю ключового ферменту циклу Кальвіна – рибулозо-1,5-бісфосфаткарбоксилази/оксигенази– і характеризує адаптивні можливості рослин до умов середовища [39,40].

На основі показників Fm, Fst та розрахункового параметра (Fm–Fst)/Fst, які визначають форму спадної частини кривої Каутського, можна стверджувати, що активація та перебіг реакцій циклу Кальвіна, а також транспорт речовин через мембрани і судини листка були ефективнішими у рослин A. tataricum, не уражених борошнистою росою.

Показник перебігу фотосинтезу (Fp–Fo)/Fv, що характеризує відносну частку неактивних реакційних центрів відносно їх загальної кількості, відображає швидкість насичення неактивних центрів PSII, відповідальних за фотоліз води та виділення кисню [41].

Підвищення значення цього параметра свідчить про порушення як у міграції енергії, так і в транспорті електронів, тоді як його зниження може вказувати на прискорення електрон-транспортних процесів.

Отримані результати підтверджують високу чутливість та інформативність методів CF/CFI у дослідженнях взаємодії рослин із патогенами та свідчать про доцільність їх використання для ранньої діагностики біотичного стресу, фенотипування рослин і розробки ефективних підходів до контролю фітопатогенів у поєднанні з іншими фізіолого-біохімічними методами аналізу.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи було отримано наступні висновки:

1. Встановлено, що ураження листків A.tataricum біотрофним патогеном S.bicornis супроводжується достовірним зниженням основних параметрів CFI (Fo, Fm, Fp, Fst, Fv), а також показників фотохімічної ефективності PSII (Fv/Fo та Fv/Fm), що свідчить про пригнічення функціонального стану фотосинтетичного апарату.
2. Найбільш чутливими до патогенного ураження виявилися параметри Fst, Fv та Fm, для яких зафіксовано найбільші значення дисперсії та статистичної значущості ($p < 0.001$; $R^2 = 0.43–0.45$), що вказує на їхню високу інформативність при оцінці фізіологічного стану рослин.
3. Похідні показники (Fm–Fst)/Fst та (Fp–Fo)/Fv не продемонстрували статистично значущих змін між ураженими та неуваженими листками ($p > 0.05$), що свідчить про їх нижчу чутливість до дії патогена в даних умовах дослідження.
4. Серед екологічних чинників лише температура мала достовірний, хоча і слабкий, вплив на стан листків ($p < 0.001$; $R^2 = 0.04$), тоді як вологість повітря та інтенсивність освітлення не виявили статистично значущих відмінностей між варіантами.
5. Доведено, що метод індукції флуоресценції хлорофілу є ефективним інструментом для діагностики порушень фотосинтетичного апарату A. tataricum за ураження S. bicornis і може бути використаний для раннього виявлення біотичного стресу та оцінки фізіологічного стану рослин у міських екосистемах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pirc, H. (1994). *Ahorne* (S. 220). Eugen Ulmer.
2. Idžojtić, M. (2019). *Dendrology* (p. 56). Academic Press.
3. Xu, T., Chen, Y., de Jong, P. C., Oterdoom, H. J., & Chang, C.-S. (2008). Aceraceae: *Acer tataricum*. In Z. Y. Wu & P. H. Raven (Eds.), *Flora of China* (Vol. 11, p. 545). Science Press; Missouri Botanical Garden Press.
4. Волошина, Н. Ю., & Білявська, Н. О. (2009). Анатомічні ознаки листків з різних рівнів крони та їх пластичність у *Acer platanoides* і *A. tataricum*. *Доповіді Національної академії наук України*, *(6)*, 173–178.
5. Волошина, Н. Ю., Топчій, Н. М., Білявська, Н. О., & Дідух, Я. П. (2008). Морфологічні ознаки та стан фотосинтетичного апарату листків *Acer platanoides* і *A. tataricum* з різних рівнів крони. *Доповіді Національної академії наук України*, *(8)*, 153–159.
6. Довбиш, К. П., Топчий, Н. М., Сиваш, О. О., & Васильченко, С. М. (2006). Фотосинтетичні характеристики *Acer platanoides* L., *A. campestre* L., *A. tataricum* L. у природних умовах за різних світлових режимів. *Український ботанічний журнал*, *63*(3), 411–421.
7. Боднарчук, Л. І., Соломаха, Т. Д., Ілляш, А. М., та ін. (1993). *Атлас медоносних рослин України* (с. 27). Урожай.
8. Мартин, Г. І., & Мусатенко, Л. І. (2007). Ультраструктура клітин зародка насіння *Acer saccharinum* L. і *A. tataricum* L., що відрізняються за станом спокою. *Український ботанічний журнал*, *64*(1), 107–114.
9. Мельник, В. І., Баранський, О. Р., Харчишин, В. Т., Хом'як, В. І., Корнійчук, В. С., & Тітова, О. Т. (2009). Флористичні знахідки на Житомирському Поліссі. *Інтродукція рослин*, *(2)*, 3–8.
10. Бродович, Т., & Бродович, М. (1973). *Атлас дерев і кущів заходу України* (с. 104). Вища школа.
11. Alexeyeva, A., Holoborodko, K., Ivanko, I., Zhukov, O., & Loza, I. (2024). Characteristics of powdery mildew influence on the photosynthetic process

in Norway maple seedlings. *Journal of Forest Science*, *70*(1), 31–39. https://doi.org/10.17221/30/2023-JFS

12. Aucique-Perez, C. E., & Román Ramos, A. E. (2024). Chlorophyll a fluorescence: A method of biotic stress detection. In *Challenges in plant disease detection and recent advancements*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1004830
13. Aucique-Pérez, C. E., Rios, V. S., Neto, L. B. C., Rios, J. A., Martins, S. C. V., & Rodrigues, F. Á. (2020). Photosynthetic changes in wheat cultivars with contrasting resistance. *Journal of Phytopathology*, *168*(11–12), 721–729. https://doi.org/10.1111/jph.12952
14. Bahadur, A. (Ed.). (2024). *Challenges in plant disease detection and recent advancements*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1000441
15. Blanco, J. A., González de Andrés, E., & Lo, Y.-H. (2021). Influence of climate change on tree growth and forest ecosystems. *Forests*, *12*(5), Article 630. https://doi.org/10.3390/f12050630
16. Chang, K. W., Tang, H., Fu, L. J., Xia, Q., Pan, Z. Y., Tan, J. L., Lysenko, V., & Guo, Y. (2025). Recent advances in plant stress analysis using chlorophyll a fluorescence. *Photosynthetica*, *63*(4), 359–373. https://doi.org/10.32615/ps.2025.037
17. Cheaib, A., & Killiny, N. (2025). Photosynthesis responses to infection with plant pathogens. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, *38*(1), 9–29. https://doi.org/10.1094/mpmi-05-24-0052-cr
18. Cui, B., Wang, X., Su, Y., Chen, Y., Yu, W., Gong, C., Li, L., Rehim, A., & Wang, X. (2021). Impacts of pavement on the growth and biomass of young trees. *Trees*, *35*(6), 2019–2029. https://doi.org/10.1007/s00468-021-02169-w
19. Einhardt, A. M., Ferreira, S., Souza, G. M. F., et al. (2020). Oxidative damage caused by soybean rust. *Acta Physiologiae Plantarum*, *42*(7), Article 115. https://doi.org/10.1007/s11738-020-03108-x

20. Hu, B., Wu, H., Li, Z., Jing, H., Zheng, Z., Han, H., Cheng, X., & Kang, F. (2023). Aridification weakens ecosystem services by reducing complexity of socio-ecological networks. *Journal of Cleaner Production*, *387*, Article 135823. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135823

21. Ivanko, I., Alexeyeva, A., Holoborodko, K., Zhukov, O., & Loza, I. (2025). Characteristics of photosynthetic processes in infected leaves of *Quercus robur* seedlings. *Forest Pathology*, *55*(4), Article e70032. https://doi.org/10.1111/efp.70032

22. Jat, M., Ray, M., Ahmad, M. A., & Prakash, P. (2024). Photosynthetic dynamics under heat stress in wheat. *Scientific Reports*, *14*, Article 30745. https://doi.org/10.1038/s41598-024-79676-6

23. Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., et al. (2016). Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status under abiotic stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, *38*(4), Article 102. https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y

24. Kautsky, H., & Hirsch, A. (1931). Neue Versuche zur Kohlensäureassimilation. *Naturwissenschaften*, *19*(48), 964. https://doi.org/10.1007/BF01516164

25. Korányi, D., & Markó, V. (2022). Host plant identity and condition shape phytophagous insect communities on urban maple trees. *Arthropod-Plant Interactions*, *16*(2), 129–143. https://doi.org/10.1007/s11829-022-09887-z

26. Kunakh, O. M., Ivanko, I. A., Holoborodko, K. K., Lisovets, O. I., Volkova, A. M., & Zhukov, O. V. (2022). Urban park layers: Spatial variation in plant community structure. *Biosystems Diversity*, *30*(3), 274–288. https://doi.org/10.15421/012230

27. Liu, Y., Gong, C., Pei, W., Fan, K., & Shen, W. (2024). Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status in the leaves of *Artemisia ordosica* under root cutting conditions. *Frontiers in Plant Science*, *14*, Article 1308209. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1308209

28. Lovynska, V. M., Sytnyk, S. A., Holoborodko, K. K., Ivanko, I. A., Buchavyi, Y. V., & Alekseeva, A. A. (2022). Study on accumulation of heavy metals by green plantations in the conditions of industrial cities. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, *(6)*, 117–122. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/117

29. Mapuranga, J., Zhang, N., Zhang, L., Chang, J., & Yang, W. (2022). Infection strategies of biotrophic fungal pathogens. *Frontiers in Microbiology*, *13*, Article 799396. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.799396

30. Mieslerová, B., Cook, R. T. A., Wheater, C. P., & Lebeda, A. (2022). Ecology of powdery mildews – influence of abiotic factors on their development and epidemiology. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *41*(6), 365–390. https://doi.org/10.1080/07352689.2022.2138044

31. Ospina Calvo, B., Juárez, Á. B., & Lagorio, M. G. (2025). Evaluating photosystem II efficiency under atrazine exposure. *Journal of Photochemistry and Photobiology B*, *267*, Article 113167. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2025.113167

32. Park, B., Wi, S., Chung, H., & Lee, H. (2024). Chlorophyll fluorescence imaging for environmental stress diagnosis in crops. *Sensors*, *24*(5), Article 1442. https://doi.org/10.3390/s24051442

33. Ramut, R. A., & Pusz, W. (2023). Fungi complicit in oak powdery mildew infection. *Acta Mycologica*, *58*, 1–9. https://doi.org/10.5586/am/166060

34. Salcedo-Sarmiento, S., Aucique-Pérez, C. E., Silveira, P. R., et al. (2021). Interactions between rust fungi and coffee plant. *iScience*, *24*(4), Article 102352. https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102352

35. Shupranova, L., Holoborodko, K., Loza, I., Zhukov, O., & Pakhomov, O. (2022). Assessment of *Parectopa robiniella* effect on biochemical parameters of *Robinia pseudoacacia* under industrial city conditions. *Ekológia (Bratislava)*, *41*(4), 340–350. https://doi.org/10.2478/eko-2022-0035

36. Silva, B. N., Oliveira, L. M., Mochko, A. C. R., Chaves, J. A. A., Aucique-Pérez, C. E., & Rodrigues, F. A. (2021). Physiological changes in wheat infected by *Pyricularia oryzae*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *115*, Article 101646. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101646

37. Song, X., Xu, Z., Zhang, W., & Tong, M. (2023). Regulation of photosynthetic activity under light spectra. *New Phytologist*, *239*(5), 1852–1868. https://doi.org/10.1111/nph.19056

38. Stefanov, M. A., Rashkov, G. D., & Apostolova, E. L. (2022). Assessment of photosynthetic apparatus by chlorophyll fluorescence. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(7), Article 3768. https://doi.org/10.3390/ijms23073768

39. Swoczyna, T., Kalaji, H. M., Bussotti, F., Mojski, J., & Pollastrini, M. (2022). Environmental stress: What can we learn from chlorophyll a fluorescence analysis in woody plants? *Frontiers in Plant Science*, *13*, Article 1048582. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1048582

40. Vasylenko, O., Kondratenko, T., Havryliuk, O., et al. (2021). Productivity potential of grape varieties. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*, *15*, 639–647. https://doi.org/10.5219/1638

41. Xia, Q., Tang, H., Fu, L., Tan, J., Govindjee, & Guo, Y. (2023). Determination of Fv/Fm without dark adaptation. *Plant Phenomics*, *5*, Article 0034. https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0034