

**А. А. Алексеєва**

кандидат біологічних наук, доцент,
старший викладач кафедри фізіології та інтродукції рослин,
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара (м. Дніпро, Україна)
E-mail: ann.alekseeva21@gmail.com
orcid.org/0000-0002-1320-6839

**К. К. Голобородько**

доктор біологічних наук, професор,
головний науковий співробітник науково-дослідної
лабораторії
наземної екології, лісового ґрунтознавства та рекультивації земель
Науково-дослідний інститут біології Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара (м. Дніпро, Україна)
E-mail: holoborodko.kk@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7857-1119

**І. А. Іванько**

кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник,
директор
Науково-дослідний інститут біології Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара (м. Дніпро, Україна)
E-mail: ivankoirina45@gmail.com
orcid.org/0000-0001-6542-1015

**В.М. Ловинська**

доктор сільськогосподарських наук, доцент,
головний науковий співробітник
науково-дослідної лабораторії лісового господарства,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет (м. Дніпро, Україна)
E-mail: glub@ukr.net
orcid.org/0000-0002-7359-9443

**С. А. Ситник**

доктор сільськогосподарських наук, доцент,
головний науковий співробітник науково-дослідної
лабораторії лісового господарства,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет (м. Дніпро, Україна)
E-mail: sytnyk.s.a@dsau.dp.ua
orcid.org/0000-0002-7646-6347

ФЛУОРЕСЦЕНЦІЯ ХЛОРОФІЛУ В ЛИСТКАХ РОСЛИН РОДУ *ACER* L. ЗА ВПЛИВУ *SAWADAEA* *BICORNIS* (WALLR.) MIYABE

У статті наведено результати дослідження впливу *Sawadaea bicornis* (Wallr.) Miyabe на стан фотосинтетичного апарату 4 видів роду *Acer* L. за допомогою методики вимірювання індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ), яка на даний час може бути реалізована за допомогою біосенсорів. Клен широко використовуються для створення паркових та лісо-паркових фітоценозів, в групових та поодиноких посадках, в озелененні міських площ, проспектів, бульварів. Однак, в умовах міста клени є більш вразливими до патогенів. Ураження фітопатогенними грибами знижує їх декоративність, а також призводить до порушення фотосинтезуючих та транспіраційних процесів, викликають всихання та відмирання як

окремих гілок так і дерев загалом. Борошниста роса – захворювання, викликане паразитичним грибом *Sawadaea bicornis* (Wallroth) Miyabe 1937, є одним з найпоширеніших, що вражає молоді саджанці та дорослі рослини кленів. Для діагностики порушень фотосинтезу нативного хлорофілу у живих листках різних видів роду *Acer* використано портативний флуорометр «FLS 10s». Виміри проводили на живих листках клену гостролистого (*A. platanoides* L.), клену татарського (*A. tataricum* L.), явору (*A. pseudoplatanus* L.), клену ясенелистого (*A. negundo* L.) у вересні 2024 р. Виміри проводили на повністю не уражених та на уражених борошнистою росою листках у межах одного дерева (по 7 на кожному). Відсоток ураження листової пластинки фітопатогеном визначався візуально. Виявлено високу інформативність індукційних змін флуоресценції хлорофілу в структурній організації хлоропластів листя клену гостролистого, що визначається за параметрами F_o , F_m , F_v , F/F_o , F/F_m , $(F_m - F_o)/F_v$, $(F_p - F_o)/F_v$. Наші дослідження показали, що метод ІФХ з використанням приладу «FLS 10s» дозволяє експресно визначати загальний стан рослини шляхом оцінки її основного процесу життєдіяльності – фотосинтезу. Аналіз параметрів флуоресценції хлорофілу є потужним і ефективним інструментом для визначення впливу грибка-паразита на рослину-господаря.

Ключові слова: грибові захворювання рослин, інтенсивність індукції флуоресценції хлорофілу, фотосинтетичний апарат рослин, біосенсиори.

A. A. Alexeyeva

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Senior Lecturer at the Department of Plant Physiology and Introduction,
Oles Honchar Dnipro National University, (Dnipro, Ukraine)
E-mail: ann.alekseeva21@gmail.com
orcid.org/0000-0002-1320-6839

K. K. Holoborodko

Doctor of Biological Sciences, Professor,
Chief Researcher at the Research Laboratory of Terrestrial Ecology, Forest Soil Science and Land Reclamation
Research Institute of Biology of Oles Honchar Dnipro National University, (Dnipro, Ukraine)
E-mail: holoborodko.kk@gmail.com
orcid.org/0000-0001-7857-1119

I. A. Ivanko

Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher,
Director
Research Institute of Biology of Oles Honchar Dnipro National University (Dnipro, Ukraine)
E-mail: ivankoirina45@gmail.com
orcid.org/0000-0001-6542-1015

V. M. Lovynska

Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Chief Researcher at the Research Laboratory of Forestry,
Dnipro State Agrarian and Economic University (Dnipro, Ukraine)
E-mail: sytnyk.s.a@dsau.dp.ua
orcid.org/0000-0002-7646-6347

S. A. Sytnyk

Doctor of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Chief Researcher at the Research Laboratory of Forestry,
Dnipro State Agrarian and Economic University, (Dnipro, Ukraine)
E-mail: glub@ukr.net
orcid.org/0000-0002-7359-9443

CHLOROPHYLL FLUORESCENCE IN LEAVES OF PLANTS OF THE GENUS ACER L. UNDER THE INFLUENCE OF SAWADAEA BICORNIS (WALLR.) MIYABE

The article presents the results of a study on the impact of *Sawadaea bicornis* (Wallr.) Miyabe on the photosynthetic apparatus of four species of the *Acer* L. genus using the chlorophyll fluorescence induction (ChlF) method, which can currently be implemented with biosensors. Maples are widely used for the formation of park and forest park phytocenoses, in group and individual plantings, as well as for landscaping urban squares, avenues, and boulevards. However, in urban environments, maples are more vulnerable to pathogens. Infection by phytopathogenic fungi reduces their ornamental value and disrupts photosynthetic and transpiration processes, leading to the drying out and death of individual branches or entire trees. Powdery mildew, a disease caused by the parasitic fungus *Sawadaea bicornis* (Wallroth) Miyabe 1937, is one of the most common diseases affecting both young saplings and mature maple trees. To diagnose photosynthesis disturbances of native chlorophyll in the living leaves of various *Acer* species, the portable fluorometer "FLS 10s" was used. Measurements were conducted on living leaves of Norway maple (*A. platanoides* L.), Tatar maple (*A. tataricum* L.), sycamore maple (*A. pseudoplatanus* L.), and boxelder maple (*A. negundo* L.) in September 2024. Measurements were taken on both completely unaffected and powdery mildew-affected leaves from the same tree (seven leaves per condition). The percentage of leaf blade infection by the phytopathogen was determined visually. A high informativeness of the induction changes in chlorophyll fluorescence in the structural organization of Norway maple chloroplasts was revealed, as determined by parameters such as F_o , F_m , F_v , F/F_o , F/F_m , $(F_m - F_o)/F_v$, $(F_p - F_o)/F_v$. Our research demonstrated that the CFI method, using the "FLS 10s" device, enables rapid assessment of the overall condition of a plant by evaluating its primary life-sustaining process – photosynthesis. The analysis of chlorophyll fluorescence parameters serves as a powerful and effective tool for determining the impact of the parasitic fungus on the host plant.

Key words: fungal plant diseases, the intensity of chlorophyll fluorescence induction, plant photosynthetic apparatus, biosensors.

Постановка проблеми. Кліматичні зміни, що спричиняють аридизацію, негативно впливають на умови зростання дерев, обмежуючи

їхню здатність виконувати екологічні та соціальні функції. 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.

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

Зважаючи на це, міські екосистеми потребують збагачення насаджень і розширення їхнього видового складу. За таких умов догляд за зеленими насадженнями має ґрунтуватися на сучасних методах експрес-діагностики стану рослин, одним із яких є метод індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед листопадних деревних порід помірної зони клени є одними з найцінніших у зеленому будівництві, лісовому господарстві та лісових насадженнях. В умовах міської забудови рослини роду *Acer* L. широко використовуються з метою створення паркових та лісопаркових фітоценозів, у групових та поодиноких посадках, в озелененні міських площ, проспектів, бульварів. Завдяки своїм високим декоративним якостям із сезонним аспектом та наявністю масивної крони, яка здатна виконувати санітарно-гігієнічну роль, адсорбуючи поверхнею листків пил та аерогенні політанти, 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. Досвід культури роду *Acer* в Україні показав перспективність інтродукції та впровадження кленів в озеленення на основі вивчення екологічної амплітуди видів та їх адаптивних властивостей в природно-кліматичних умовах певного інтродукційного району. Однак, в умовах міста клени є більш чутливими до патогенів. Ураження фітопатогенними грибами знижує їх декоративність, а також призводить до порушення фотосинтезуючих та транспіраційних процесів, викликають всихання та відмирання як окремих гілок так і дерев загалом [4].

Однією з найпоширеніших хвороб, що вражає молоді проростки і дорослі рослини роду *Acer*, є борошниста роса, зумовлена паразитним грибом *Sawadaea bicornis* (Wallroth) Miyabe 1937. Вплив борошнистої роси на рівні листка істотно залежить від часу і ступеня зараження, оскільки чутливість листя до фітопатогену залежить від його віку. Більш чутливі до пошкодження *S. bicornis* молоді листки і верхівки пагонів, тому борошністу росу насамперед можна спостерігати саме на верхівках рослин. За сильного ступеня ураження нальотом вкриваються всі листки і стебла, після чого вони жовтіють і всихають.

Борошниста роса є одним з найбільш небезпечних захворювань рослин, особливо на ранніх етапах їх онтогенезу, оскільки здатна зупинити ріст проростків, суттєво погіршити зимівлю, викликати повне опадання листя і істотно виснажити рослину [9].

Фотосинтез є універсальним процесом виживання рослин, а імунний захист – ключовим процесом адаптації рослин до умов зростання. Різні дослідження показали, що ці два процеси взаємопов'язані у складній мережі. Фотосинтез може впливати на сигнальні шляхи і забезпечувати матеріали та енергію для імунного захисту, в той час як процес імунного захисту також може зворотно впливати на фотосинтез.

Сучасні методи дозволяють отримувати інформацію про стан фотосинтетичного апарату рослин та оцінювати ступінь впливу на нього несприятливих чинників довкілля. Суттєвою перевагою їх є те, що вони здатні реєструвати навіть незначні зміни в активності фотосинтетичного апарату та дозволяють це оперативного здійснювати безпосередньо в польових умовах і досить швидко та просто. Метод індукції флуоресценції хлорофілу ґрунтується на вимірюванні рівня флуоресценції хлорофілу у рослин при інтенсивному освітленні після нетривалого періоду темної адаптації. Цей метод є достатньо чутливим та дозволяє швидко встановити зміни в фотосинтетичному апараті під дією стресу та регенераційний потенціал інтактних рослин [2].

Метою статті є встановлення ефективності застосування методу, що базується на оцінці інтенсивності індукції флуоресценції хлорофілу для визначення функціонального стану фотосинтетичного апарату листків рослин роду *Acer*, уражених *S. bicornis*.

Методика дослідження. Дослідження за даною тематикою виконане впродовж вегетаційного сезону 2024 р. у м. Дніпро. Місто розташоване у зоні помірних широт з досить активною атмосферною циркуляцією (переважним переміщенням повітряних мас зі сходу на захід). Клімат помірно-континентальний. Однією з особливостей клімату території є значні коливання погодних умов з року в рік. Помірно вологі роки чергуються з різко посушливими, нерідкі сухості. У цілому клімат характеризується досить прохолодною зимою і спекотним літом.

На території м. Дніпро у 1931 р. засновано Ботанічний сад Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (48°26' N, 35°02' E; 127 м над рівнем моря). На його території культивуються клен гостролистий (*A. platanoides* L.), клен татарський (*A. tataricum* L.), які природно зростають у степовій зоні, явір (*A. pseudoplatanus* L.), ареал якого знаходиться в західних областях України і на Поділлі, а також північноамериканський інтродуцент клен ясенелистий (*A. negundo* L.).

Ґрунти представлені урбоґрунтами, сформованими на зональних чорноземах звичайних малогумусових середьосуглинистих на лесовидних суглинках [6].

Для діагностики порушень фотосинтезу нативного хлорофілу у живих листках різних видів роду *Acer* було використано портативний флуорометр «FLS 10s».

Діагностику виконували на живих листках рослин роду *Acer* (по 7 штук на кожному) у вересні 2024 р. Виміри проводили як на повністю не уражених, так і на уражених борошнистою россою листках у межах одного дерева.

Для інтерпретації кривої Каутського, ми використали відомі її критичні параметри: F_0 – початкове значення індукції флуоресценції після включення опромінення; F_p – значення індукції флуоресценції «плато»; F_m – максимальне значення індукції флуоресценції; F_{st} – стаціонарне значення індукції флуоресценції після світлової адаптації листка рослини. Окрім критичних параметрів кривої Каутського нами було використано розрахункові: $F_v = F_m - F_0$ – змінна флуоресценція хлорофілу; F_v/F_m – максимальна квантова ефективність фотосистеми II (ФСII); F_v/F_0 – максимальний початковий вихід фотохімії ФСII; $(F_m - F_{st})/F_{st}$ – коефіцієнт ефективності фотохімічних процесів; $(F_p - F_0)/F_v$ – частка QA-акцепторів невідновлюваних реакційних центрів PSII [3].

Статистичну обробку даних здійснено за допомогою ПК з використанням статистичного програмного забезпечення STATISTICA (StatSoft, 2014).

Основні результати дослідження. Внаслідок проведеного аналізу змін індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ) визначено вплив фітопатогенного гриба *S. bicornis* та генотипної специфічності на окремі показники ІФХ листків досліджуваних видів роду *Acer* та коефіцієнти, що характеризують перебіг світлових фаз фотосинтезу й ефективність фотохімічних процесів для темнових фаз засвоєння енергії світла. Під час дослідження впливу борошнистої роси на фотосинтетичний апарат кленів було встановлено, що показники ІФХ, які відображають процеси перетворення енергії на початкових етапах фотосинтезу, відрізняються у здорових та уражених листків рослин. Вплив паразитного гриба *S. bicornis* спричинив у рослин роду *Acer* досить різні за інтенсивністю і спрямованістю зміни індукції флуоресценції хлорофілу (табл. 1).

Показник F_0 залежить від втрат енергії збудження при її міграції по пігментній матриці світлозбиральних комплексів. У заражених борошнистою россою листках усіх видів кленів цей показник зменшувався на 10–25,8% у порівнянні з незараженими, що свідчить про зменшення втрат енергії під час її міграції до реакційних центрів (РЦ). Зі зменшенням кількості антенних хлорофілів знижується початковий рівень флуоресценції і навпаки. Отримані дані свідчать про зменшення ефективності використання поглинутого світла у заражених листками кленів [11].

Параметр F_m характеризує найвищий рівень флуоресценції хлорофілу a , що реєструється у вигляді максимуму на індукційній кривій. Цей показник найбільш варіабельний з усіх інших, що зумовлено адаптивними змінами у структурі пігментного комплексу. Значення F_m у пошкоджених

S. bicornis листків у всіх досліджуваних дерев було меншим порівняно з неушкодженими. Значне зменшення цього параметра за впливу *S. bicornis* зафіксовано для видів *A. negundo* (на 41,6 %) і *A. tataricum* (на 46,6%), що, можливо, пов'язано з блокуванням ресинтезу хлорофілу, деградацією та руйнуванням структури хлоропластів, зменшенням їх кількості за впливу фітопатогену [5].

Показник F_v/F_m характеризує ефективність світлової фази фотосинтезу та водночас є найбільш інтегрованим показником. За співвідношенням F_v/F_m оцінюють квантовий вихід ФСII. Чутливість F_v/F_m до інгібування світлової фази фотосинтезу робить цей показник ефективним засобом моніторингу стресових чинників навколишнього середовища на рослини. Результати вимірювань дають підставу стверджувати про нормальні показники ефективності світлової фази фотосинтезу для всіх експериментальних видів кленів за впливу фітопатогену, адже вони змінюються в межах 0,71–0,82, що є достатнім для забезпечення функціонування пігментного комплексу ФСII, що засвідчує пластичність структурних змін в організації пігментного комплексу хлоропластів [7]. Однак у пошкоджених борошнистою россою листках усіх досліджуваних видів спостерігалось зменшення цього показника у порівнянні з непошкодженими, що свідчить про порушення функціональної активності комплексів ФСII внаслідок дії стресового чинника – *S. bicornis*. Зниження F_v/F_m свідчить про поступове скорочення світлозбиральної антени PSII завдяки деградації пігмент-білкових комплексів в її складі [12].

Під час діагностування змін, що відбувалися у фотосинтетичному апараті рослин видів роду *Acer*, було визначено параметр F_v/F_0 , що відображає ефективність використання енергії збудження у ФСII. Тенденції змін параметру F_v/F_0 були ідентичними до змін параметру F_v/F_m , проте були більш істотними, що демонструє більшу його чутливість до впливу *S. bicornis* на фотосинтетичний апарат кленів [8].

Коефіцієнт плато $(F_p - F_0)/F_v$, який характеризує відносну кількість неактивних реакційних центрів відносно загального числа реакційних центрів, у дослідних рослин був у межах 0,33–0,53. Вплив борошнистої роси на рослини *A. platanoides* призводить до зростання значення $(F_p - F_0)/F_v$ на 23,3%. У видів *A. pseudoplatanus* та *A. tataricum* навпаки, значення коефіцієнту зменшувалося відповідно на 30% та 19,2%. У листках *A. negundo* даний коефіцієнт залишався незмінним. Коефіцієнт $(F_p - F_0)/F_v$ інформує про швидкість насичення неактивних реакційних центрів ФСII, яка відповідає за розклад води і виділення кисню. Підвищення коефіцієнту $(F_p - F_0)/F_v$ означає порушення як у міграції енергії, так і у транспорті електронів, а зниження свідчить про можливе прискорення електрон-транспортних процесів.

Ще одним показником, важливим для оцінювання функціонального стану листків,

Таблиця 1

Описова статистика змін ІФХ (середнє $\pm$ ст. відхилення) з відсотковим впливом (Impact, %) у листках *Acer* за впливу *S. bicornis*

Вид	Листки	Fo	Fp	Fm	Fst	Fv	Fv/Fm	Fv/Fo	(Fp-Fo)/Fv	(Fm-Fst)/Fst	Температура, °C	Вологість%	Освітленість, klx
<i>A. negundo</i>	Неуражені	395.6 $\pm$ 20.8a	1222.9 $\pm$ 78.8a	2082.6 $\pm$ 163.8a	1582.1 $\pm$ 160.6a	1680.1 $\pm$ 147.3a	0.81 $\pm$ 0.01a	4.24 $\pm$ 0.23a	0.49 $\pm$ 0.02a	0.32 $\pm$ 0.08a	22.8 $\pm$ 0.1a	40.1 $\pm$ 0.7a	8.4 $\pm$ 2.3a
	Уражені	334.7 $\pm$ 45.0b	769.3 $\pm$ 153.6b	1215.7 $\pm$ 236.1b	877.3 $\pm$ 139.3b	876.4 $\pm$ 187.8b	0.72 $\pm$ 0.02b	2.60 $\pm$ 0.30b	0.49 $\pm$ 0.04a	0.38 $\pm$ 0.14a	22.5 $\pm$ 0.1b	40.3 $\pm$ 0.6a	6.5 $\pm$ 0.5a
	Impact (%)	-15.40%	-37.10%	-41.60%	-44.60%	-47.80%	-10.90%	-38.70%	-0.10%	19.90%	-0.90%	0.50%	-21.70%
<i>A. platanoides</i>	Неуражені	351.4 $\pm$ 12.3a	993.0 $\pm$ 57.1a	1742.4 $\pm$ 90.0a	1416.3 $\pm$ 75.3a	1385.3 $\pm$ 97.3a	0.79 $\pm$ 0.02a	3.95 $\pm$ 0.32a	0.46 $\pm$ 0.03a	0.23 $\pm$ 0.04a	22.4 $\pm$ 0.2a	39.9 $\pm$ 1.7a	5.6 $\pm$ 0.6b
	Уражені	319.0 $\pm$ 46.2a	695.6 $\pm$ 24.2b	1111.3 $\pm$ 252.7b	848.6 $\pm$ 174.3b	792.3 $\pm$ 208.7b	0.71 $\pm$ 0.03b	2.45 $\pm$ 0.36b	0.53 $\pm$ 0.27a	0.31 $\pm$ 0.14a	22.5 $\pm$ 0.1a	40.0 $\pm$ 0.6a	8.6 $\pm$ 0.7a
	Impact (%)	-9.20%	-30.00%	-36.20%	-40.10%	-42.80%	-11.00%	-38.00%	14.20%	34.30%	0.30%	0.40%	53.60%
<i>A. pseudoplatanoides</i>	Неуражені	318.7 $\pm$ 26.0a	888.3 $\pm$ 80.5a	1531.4 $\pm$ 136.3a	1253.7 $\pm$ 124.7a	1206.7 $\pm$ 110.4a	0.79 $\pm$ 0.01a	3.78 $\pm$ 0.10a	0.47 $\pm$ 0.04a	0.22 $\pm$ 0.05b	21.9 $\pm$ 0.0a	40.9 $\pm$ 1.0a	5.2 $\pm$ 0.8a
	Уражені	273.0 $\pm$ 25.8b	557.0 $\pm$ 78.3b	1114.4 $\pm$ 116.8b	789.4 $\pm$ 79.2b	848.6 $\pm$ 102.5b	0.76 $\pm$ 0.02b	3.10 $\pm$ 0.17b	0.33 $\pm$ 0.03b	0.41 $\pm$ 0.08a	21.8 $\pm$ 0.1b	41.3 $\pm$ 0.2a	5.5 $\pm$ 0.2a
	Impact (%)	-14.30%	-37.30%	-27.20%	-37.00%	-29.70%	-3.50%	-18.00%	-29.60%	85.20%	-0.50%	1.00%	7.60%
<i>A. tataricum</i>	Неуражені	339.3 $\pm$ 20.7a	1072.1 $\pm$ 55.3a	1903.0 $\pm$ 102.6a	1573.4 $\pm$ 96.4a	1563.7 $\pm$ 84.5a	0.82 $\pm$ 0.00a	4.61 $\pm$ 0.15a	0.47 $\pm$ 0.03a	0.21 $\pm$ 0.03a	23.2 $\pm$ 0.2a	42.1 $\pm$ 0.7a	9.0 $\pm$ 0.3a
	Уражені	255.3 $\pm$ 26.5b	541.4 $\pm$ 89.6b	1016.9 $\pm$ 167.5b	853.7 $\pm$ 148.9b	755.6 $\pm$ 150.7b	0.74 $\pm$ 0.03b	2.94 $\pm$ 0.38b	0.38 $\pm$ 0.04b	0.19 $\pm$ 0.05a	22.9 $\pm$ 0.2b	41.7 $\pm$ 1.0a	9.2 $\pm$ 0.4a
	Impact (%)	-24.80%	-49.50%	-46.60%	-45.70%	-51.70%	-10.00%	-36.20%	-19.40%	-7.70%	-1.20%	-1.00%	1.30%

Примітка: Різні літери позначають статистично вірогідні відмінності для $P < 0.05$.

є коефіцієнт ефективності темнових фотохімічних процесів – $(F_m - F_{st})/F_{st}$. Цей параметр демонструє величину гасіння флуоресценції, на яку впливають як фотохімічні (фіксація CO_2), так і нефотохімічні процеси (теплова дисипація енергії збудженого стану молекул хлорофілу) [1]. За цим показником найнижчу ефективність фотохімічних процесів зафіксовано у заражених листках клену татарського.

За результатами описової статистики (див. табл. 1) встановлено, що для *A. negundo* середній імпакт для первинних змінних (F_o , F_p , F_m , F_{st} , F_v) становив – 37,3%, для *A. platanoides* – –31,7%, для *A. pseudoplatanoides* – –29,1%, для *A. tataricum* – 43,7%. Таким чином, найменший рівень фізіологічних відхилень спостерігався у *A. pseudoplatanoides*, а найбільший – у *A. tataricum*.

Висновки. Аналіз отриманих даних свідчить про високу чутливість параметрів індукції флуоресценції хлорофілу від ушкоджуючого впливу фітопатогенів, несприятливих техногенних факторів умов існування та генотипових особливостей досліджуваних рослин роду *Acer*. Виявлено високу пластичність структурної організації хлоропластів листків видів *A. negundo*, *A. platanoides*, *A. pseudoplatanoides*, *A. tataricum* за впливу збудника борошнистої роси *S. bicornis* в умовах м. Дніпро. Зміни параметру F_v/F_o були ідентичними до змін параметру F_v/F_m , проте були більш істотними, що демонструє більшу його чутливість до впливу гриба на фотосинтетичний апарат кленів. Специфічно чутливим до ураження фітопатогеном були коефіцієнти $(F_p - F_o)/F_v$ та $(F_m - F_{st})/F_{st}$.

Література

1. Alexeyeva A., Holoborodko K., Ivanko I., Zhukov O., Loza I. Characteristics of powdery mildew [*Sawa-daea bicornis* (Wallr.) Miyabe] influence on the photosynthetic process in Norway maple (*Acer platanoides* L.) seedlings. *J. For. Sci.* 2024. Vol. 70. P. 31–39. <https://doi.org/10.17221/30/2023-JFS>
2. Baghbani F., Lotfi R., Moharramnejad S., Bandehagh A., Roostaei M., Rastogi A., Kalaji M. H. Impact of *Fusarium verticillioides* on chlorophyll fluorescence parameters of two maize lines. *European Journal of Plant Pathology*. 2019. Vol. 154, № 2. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-01659-x>
3. Kautsky H., Hirsch A. Neue Versuche zur Kohlensäureassimilation. *Naturwissenschaften*. 1931. Vol. 19. P. 964. <https://doi.org/10.1007/BF01516164>
4. Korányi D., Markó V. Host plant identity and condition shape phytophagous insect communities on urban maple (*Acer* spp.) trees. *Arthropod-Plant Interactions*. 2022. Vol. 16. P. 129–143. <https://doi.org/10.1007/s11829-022-09887-z>
5. Lahr E.C., Dunn R.R., Frank S.D. Variation in photosynthesis and stomatal conductance among red maple (*Acer rubrum*) urban planted cultivars and wildtype trees in the southeastern United States. *PLOS ONE*. 2018. Vol. 13, № 5. P. e0197866. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197866>
6. Lovynska V.M., Sytnyk S.A., Holoborodko K.K., Ivanko I.A., Buchavyi Yu.V., Alekseeva A.A. Study on accumulation of heavy metals by green plantations

in the conditions of industrial cities. *Naukovy Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. Vol. 6. P. 117–122. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/117>

7. Matlok N., Szostek M., Antos P., Gajdek G., Gorzelany J., Bobrecka-Jamro D., Balawejder M. Effect of foliar and soil fertilization with new products based on calcinated bones on selected physiological parameters of maize plants. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 7. P. 2579. <https://doi.org/10.3390/app10072579>

8. Peng J., Feng Y., Wang X., Li J., Xu G., Phonenasay S., Luo Q., Han Z., Lu W. Effects of nitrogen application rate on the photosynthetic pigment, leaf fluorescence characteristics, and yield of indica hybrid rice and their interrelations. *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. P. 7485. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86858-z>

9. Ramut R.A., Puszt, W. Fungi complicit in oak powdery mildew infection in the Oława Forest District. *Acta Mycologica*. 2023. Vol. 58. P. 1–9. <https://doi.org/10.5586/am/166060>

10. Wang X.M., Wang X.K., Chen Y.Y., Berlyn G.P. Photosynthetic parameters of urban greening trees growing on paved land. *iForest*. 2019. Vol. 12. P. 403–410. <https://doi.org/10.3832/for2939-012>

11. Zhang Y., Guanter L., Joiner J., Song L., Guan K. Spatially-explicit monitoring of crop photosynthetic capacity through the use of space-based chlorophyll fluorescence data. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 210. P. 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.031>

12. Zhu Z., Cao H., Li X., Rong J., Cao X., Tian J. A Carbon Fixation Enhanced *Chlamydomonas reinhardtii* Strain for Achieving the Double-Win Between Growth and Biofuel Production Under Non-stressed Conditions. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. Vol. 8. P. 603513. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.603513>

References

1. Alexeyeva A., Holoborodko K., Ivanko I., Zhukov O., Loza I. (2024): Characteristics of powdery mildew [*Sawa-daea bicornis* (Wallr.) Miyabe] influence on the photosynthetic process in Norway maple (*Acer platanoides* L.) seedlings. *J. For. Sci.*, 70: 31–39. <https://doi.org/10.17221/30/2023-JFS>
2. Baghbani F., Lotfi R., Moharramnejad S., Bandehagh A., Roostaei M., Rastogi A., Kalaji M. H. (2019): Impact of *Fusarium verticillioides* on chlorophyll fluorescence parameters of two maize lines. *European Journal of Plant Pathology*, 154(2): 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-01659-x>
3. Kautsky H., Hirsch A. (1931): Neue Versuche zur Kohlensäureassimilation. *Naturwissenschaften*, 19: 964. <https://doi.org/10.1007/BF01516164>
4. Korányi D., Markó V. (2022): Host plant identity and condition shape phytophagous insect communities on urban maple (*Acer* spp.) trees. *Arthropod-Plant Interactions*, 16: 129–143. <https://doi.org/10.1007/s11829-022-09887-z>
5. Lahr E.C., Dunn R.R., Frank S.D. (2018): Variation in photosynthesis and stomatal conductance among red maple (*Acer rubrum*) urban planted cultivars and wildtype trees in the southeastern United

States. *PLOS ONE*, 13(5): e0197866. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197866>

6. Lovynska V.M., Sytnyk S.A., Holoborodko K.K., Ivanko I.A., Buchavyi Yu.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>

7. Matlok N., Szostek M., Antos P., Gajdek G., Gorzelany J., Bobrecka-Jamro D., Balawejder M. (2020): Effect of foliar and soil fertilization with new products based on calcinated bones on selected physiological parameters of maize plants. *Applied Sciences*, 10(7): 2579. <https://doi.org/10.3390/app10072579>

8. Peng J., Feng Y., Wang X., Li J., Xu G., Phonenasay S., Luo Q., Han Z., Lu W. (2021): Effects of nitrogen application rate on the photosynthetic pigment, leaf fluorescence characteristics, and yield of indica hybrid rice and their interrelations. *Scientific Reports*, 11: 7485. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86858-z>

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

10. Wang X.M., Wang X.K., Chen Y.Y., Berlyn G.P. (2019): Photosynthetic parameters of urban greening trees growing on paved land. *iForest*, 12: 403–410. <https://doi.org/10.3832/for2939-012>

11. Zhang Y., Guanter L., Joiner J., Song L., Guan K. (2018): Spatially-explicit monitoring of crop photosynthetic capacity through the use of space-based chlorophyll fluorescence data. *Remote Sensing of Environment*, 210: 362–374. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.031>

12. Zhu Z., Cao H., Li X., Rong J., Cao X., Tian J. (2021): A Carbon Fixation Enhanced Chlamydomonas reinhardtii Strain for Achieving the Double-Win Between Growth and Biofuel Production Under Non-stressed Conditions. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8: 603513. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.603513>

Дата першого надходження рукопису до видання: 12.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 30.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025