

УДК 632.123:635.49
DOI 10.17721/1728.2748.2022.88.25-32

М. Мазура, канд. біол. наук,
Н. Мірошник, канд. біол. наук,
І. Тесленко, пров. інженер
ДУ "Інститут еволюційної екології НАН України", Київ, Україна

ЧУТЛИВІСТЬ ФОТОСИНТЕТИЧНОГО АПАРАТУ РОСЛИН *TARAXACUM OFFICINALE* (L.) WEBER EX F.H.WIGG. В УМОВАХ МЕГАПОЛІСУ

Наведено порівняльну оцінку функціонального стану пігментного комплексу живих листків рослин *Taraxacum officinale* (L.), що зростають у паркових екосистемах м. Києва з різним рівнем аерогенного забруднення. Фітоіндикатором для досліджень було обрано кульбабу лікарську. У визначених парках для вивчення функціонального стану фотосинтетичного апарату рослин *T. officinale* було обрано по два тест-полігони (біля автошляхів та у центрі парку). Дослідження проводили з використанням портативного флуориметра "Флоратест", розробленого Інститутом кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України. За результатами досліджень змін показників індукції флуоресценції хлорофілу у листках, що характеризують ефективність фотохімічних процесів на градієнті забруднення повітря, найпоказовішими виявились: F_m – максимальна флуоресценція; F_v – варіабельна флуоресценція, її рівень є індикатором фотохімічних окиснювально-відновних процесів, та k_1 – індикаторний показник впливу екзогенних чинників на рослини, які мають високий зворотний кореляційний зв'язок з показниками аерогенного забруднення. Наведені показники вказують на фоточутливість асиміляційного апарату рослин *T. officinale* до умов зростання та можливість використання їх значень при біоіндикаційних дослідженнях навколишнього природного середовища.

Ключові слова: антропогенне навантаження, фітоіндикатор, флуоресценція хлорофілу, паркові екосистеми.

Вступ. На сьогоднішній день антропогенне навантаження на природне середовище спричиняє низку екологічних проблем, насамперед у великих містах, де забруднюється повітря через функціонування підприємств, велику кількість автомобільного транспорту тощо [1–5]. Високий рівень забруднення повітря у м. Києві як один із наслідків урбанізації становить загрозу здоров'ю населення, стану біотичних складових міста [4, 6]. Аеротехногенне забруднення мегаполісу обумовлено викидами стаціонарних (промислові підприємства, ТЕЦ) і пересувних джерел (насамперед автотранспорт, авіаційна техніка). Воно щорічно зростає. Нами докладно досліджено аерозабруднення від автошляхів у Київському мегаполісі та його вплив на стан паркових екосистем і пилок *T. officinale* [7–9]. Найнебезпечнішими для зелених насаджень міст є надмірні концентрації аерофітотоксикантів NH_3 , NO_x (NO , NO_2 , NO_3), SO_2 , формальдегід, фенол, важкі метали (Cu, Pb, Ni, Cr, Cd, Co, Zn), джерелами надходження яких до природного середовища є промислові підприємства й автотранспорт [4, 5, 10, 11]. Тому існує необхідність у діагностиці стану довкілля, яку можна проводити як фізико-хімічними, так і фітоіндикаційними методами [5, 13–15]. Фітомоніторинг з метою контролю антропогенного впливу на біосферу є перспективним напрямом досліджень, що не вимагає значних грошових витрат [5, 7, 8]. Рослини є показовими індикаторами забруднення природного середовища вже на початкових його стадіях, що дає можливість оцінити екологічний стан урбосередовища [1, 9].

Для досліджень у паркових екосистемах м. Києва фітоіндикатором було обрано кульбабу лікарську (*Taraxacum officinale* (L.) Weber ex F.H.Wigg.), тому що в мегаполісі вона є поширеною, найбільш невибагливою придорожною рослиною [9]. Дослідниками проаналізовано фітоіндикаційні можливості кульбаби лікарської, а саме такі фізіологічні показники, як вміст аскорбінової кислоти та концентрація хлорофілу. Зроблено висновки про інформативність та можливість їх використання у фітомоніторингу середовища урбоекосистеми [1]. Для експрес-оцінювання стану природних і міських екосистем з метою зонування та визначення ступеня техногенного забруднення вивчено вегетаційні індекси кульбаби лікарської [10]. Досліджено кількісні та якісні особливості пилку рослини кульбаби лікарської і їх реакції на

екологічну дестабілізацію [8, 9, 14]. Сучасні підходи до оцінювання екологічного стану навколишнього природного середовища стосуються переважно абіотичного блоку екосистеми. Більш повне й об'єктивне оцінювання антропогенного навантаження на екосистеми можливе за умови поєднання біоіндикаційних методів. Тому, разом з методом паліноіндикації за тестом "Стерильність пилку рослин-біоіндикаторів" [8, 9], ми використали метод індукції флуоресценції хлорофілу рослин-біоіндикаторів [15–17].

Показано, що вимірювання флуоресценції хлорофілу є найбільш швидким та інформативним методом, який використовується у екологічному моніторингу та є потужним інструментом вивчення впливу найрізноманітніших екологічних факторів на рослинні організми [15, 16]. Метод індукції флуоресценції хлорофілу (ІФХ) полягає у такому: лист рослини опромінюють синім світлом, молекули хлорофілу збуджуються і починають випромінювати світло в червоній області спектра. Інтенсивність випромінювання залежить від стану рослини. Залежність інтенсивності випромінювання від часу називається кривою Каутського (кривою ІФХ), яка характеризує процес фотосинтезу [16, 18]. Певні ділянки кривої є індикаторами фізіологічних процесів рослин у ланцюзі фотосинтезу. Порушення окремих його ланок, спричинені різними чинниками навколишнього середовища, виявляються у характерних змінах відповідних ділянок кривої ІФХ [18, 19].

Фізіологічно значущі дані отримують на основі аналізу таких кінетичних параметрів, як: F_0 – інтенсивність флуоресценції хлорофілу при відкритих реакційних центрах (РЦ) фотосистеми II (ФС II); F_m – максимальна флуоресценція при закритих РЦ; F_v – варіабельна флуоресценція, її рівень є індикатором фотохімічних окиснювально-відновних процесів, характеризує активність початкових стадій фотосинтезу; F_{st} – стаціонарна флуоресценція; параметр F_v/F_m – ефективний засіб моніторингу стресових чинників на рослину, оскільки є чутливим до інгібування світлової фази фотосинтезу [20].

За допомогою портативного приладу "Флоратест" зазначено високу пластичність у структурній організації хлоропластів листків *Philadelphus* L., яка характеризується інтенсивним спадом флуоресценції хлорофілу до стаціонарного рівня, що є ознакою високої ефективності темнових фотохімічних реакцій [18]. Було вивчено

функціональний стан пігментного комплексу листового апарату деревних рослин *Aesculus x carnea* Zeyh., *Tilia cordata* Mill., *Rhus typhina* L. у різних урбоекотопах м. Києва та виявлено незначне погіршення функціонального стану листків деревних рослин біля транспортних шляхів порівняно з рослинами зон житлових забудов та парків м. Луцьк [21, 22]. Виявлено залежності концентрації CO₂ у повітрі зі змінами фотосинтезу плодкових дерев від факторів середовища. Показано можливість використання якісних і кількісних закономірностей ІФХ листків для моніторингу стресового стану деревних видів рослин на території міст [23].

Матеріали та методи. Для біоіндикаційних досліджень були взяті паркові екосистеми у чотирьох адміністративних районах Києва, які відрізняються між собою за рівнем забруднення атмосферного повітря, водних об'єктів, насиченістю території міста вулично-дорожньою мережею тощо. У кожному парку для дослідження функціонального стану фотосинтетичного апарату (ФСА) фітоіндикатора *T. officinale* методом ІФХ обрано по два тест-полігони (біля автошляхів та у центрі парку) (рис. 1).

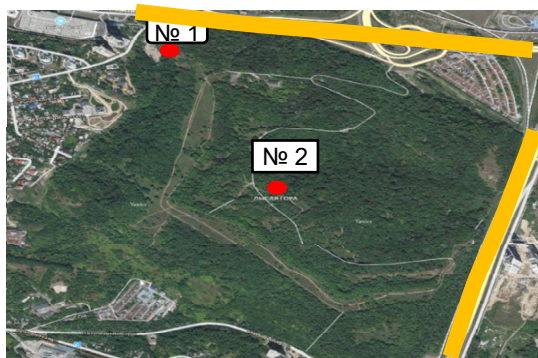
Заказник "Лиса Гора". Голосіївський район, що розміщений на околиці міста і межує з його зеленим поясом лісопарків. Екологічна ситуація характеризується як дуже хороша [4]. Тест-полігон № 1 міститься з боку Стратегічного шосе біля дороги з активним трафіком (6058,5 авто/год) на відстані 26 м поблизу будівництва, рівень витоптування високий. Тест-полігон № 2 розташований у центрі заказника на відстані близько 617 м від Стратегічного шосе. За особливостями ландшафту ця ділянка лежить вище від інших дослідних ділянок та автошляхів, територія зростання *T. officinale* розташована на галявині серед

лісових насаджень, рівень витоптування мінімальний, тому цей тест-полігон обраний контролем (рис. 1).

Маріїнський парк. Печерський район (центральный район міста), найменший за площею, але густонаселений, з високим відсотком висотної забудови та автодоріг. Парк розташований поблизу дороги з навантаженням (2010,0 авто/год) – вул. Михайла Грушевського. Тест-полігон № 1 міститься біля автошляху на відстані 4 м, рівень витоптування середній; тест-полігон № 2 – у центрі парку, рівень витоптування мінімальний, відстань від міської дороги становить 167 м, тому цю ділянку обрано контролем (рис. 1).

Парк "Перемога". Дарницький район, із хорошою екологічною ситуацією, парк розташований поряд з автошляхом – проспект Визволителів, навантаження транспортом цієї дороги становить 2356,5 авто/год. Тест-полігон № 1 розташований біля міської дороги на відстані близько 7 м, піддається масовому витоптуванню. Тест-полігон № 2 міститься у центрі парку на відстані 276 м від міської дороги (навантаження 2356,5 авто/год) та 7 м від центральної пішохідної дороги парку, рівень витоптування низький, тому саме цей полігон обрано контролем (рис. 1).

Урочище Бабин Яр. Шевченківський район, займає перше місце за кількістю твердих побутових відходів, тому що є густонаселеним [4]. Урочище з усіх боків обмежене автошляхами, але найнавантаженішою є дорога, біля першого тест-полігону (4898,0 авто/год) – вул. Олени Теліги. Віддаленість тест-полігону № 1 від міської дороги становить близько 6 м, територія зростання *T. officinale* лежить на узбіччі пішохідної дороги, рівень витоптування високий. Тест-полігон № 2 розташований на відстані близько 19 м від міської дороги, позаду пам'ятника Олені Телізі, де є дві пішохідні доріжки, рівень витоптування середній.



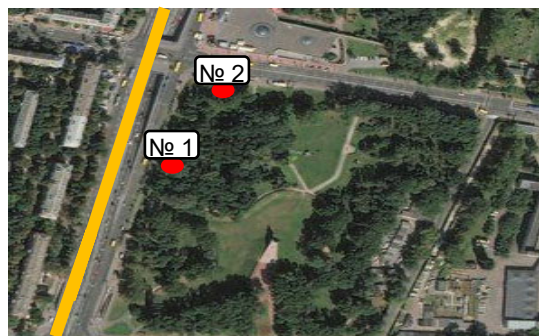
Заказник "Лиса Гора"



Маріїнський парк



Парк "Перемога"



Урочище Бабин Яр

Рис. 1. Карти досліджених парків Києва з тест-полігонами, де кружки – тест-полігони, товстими лініями позначені автошляхи з визначеною інтенсивністю руху транспорту

Для отримання даних про вплив чинників на фотосинтетичний апарат *T. officinale* використали портативний флуориметр "Флоратест", розроблений Інститутом кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України. Дослідження проводили на живому листі, адаптація до темряви – 5 хв, довжина хвилі опромінення – 470 ± 15 нм; площа опроміненої плями – не менше 15 мм^2 , освітленість у межах плями – $2,4 \text{ Вт/м}^2$. Спектральний діапазон вимірювання флуоресценції становив від 670 до 800 нм [24]. На кожному тест-полігоні здійснено 15 вимірювань. Використовували програму Excel 2016 пакету Microsoft Office. Індукційна крива показує залежність інтенсивності флуоресценції хлорофілу від часу з початку освітлення. Фізіологічно значущі дані отримували на основі аналізу таких кінетичних параметрів: (F_0) – початкове значення індукції флуоресценції після включення опромінення; (F_m) – максимальне значення індукції флуоресценції; стаціонарне значення індукції флуоресценції після світлової адаптації (F_{st}) – показник кількості хлорофілів, які не беруть участі у передаванні енергії на реакційні центри. Розраховували варіабельну флуоресценцію (F_v): $F_v = F_m - F_0$.

Максимальна ефективність використання енергії світла реакційними центрами фотосистеми 2 розраховується як відношення змінної флуоресценції ($F_v = F_m - F_0$) до максимальної, тобто F_v/F_m . Цей параметр характеризує максимальну ефективність первинних процесів фотосинтезу, які залежать від фізіологічного стану рослини.

Для оцінювання стану апарату фотосинтезу рослин також використовували показники: $k_1 = F_m/F_{st}$ – індикаторний показник впливу екзогенних чинників; $k_2 = (F_m - F_{st})/F_m$ – коефіцієнт індукції флуоресценції (індикаторний показник квантового виходу флуоресценції). Всі зазначені показники окремо або у комплексі використовують для оцінювання впливів ушкоджуючих чинників на ФСА нативного хлорофілу та рослин у цілому. Статистичну обробку даних проводили з використанням програми Microsoft Office Excel 2013.

Результати та їх обговорення. Для дослідження чутливості фотосинтетичного апарату листків рослин *T. officinale* на градієнті аерогенного навантаження було обрано по два тест-полігони у парках (один біля автошляхів, інший у центрі парку).

Найбільше аерогенне навантаження мають рослини *T. officinale*, які зростають на тест-полігоні № 1 у заказнику "Лиса Гора", де відстань до автошляхів з інтенсивним трафіком (6058,50 авто/год) становить близько 26 м, сума забруднюючих речовин найвища – $0,2109 \text{ мг/м}^2$ (табл. 1). Найбільш сприятливими для зростання фітоіндикатора з досліджених урбоєкосистем мегаполісу вважаємо умови на тест-полігоні № 2 у Маріїнському парку (відстань до дороги 167 м, навантаження транспортом 2010 авто/год, сума забруднюючих речовин найменша – $0,0861 \text{ мг/м}^2$) і тест-полігоні № 2 у парку "Перемога", відстань до автошляхів з автотрафіком (2356,50 авто/год) становить 267 м, сума забруднюючих речовин повітря – $0,1161 \text{ мг/м}^2$ [26] (табл. 1).

Таблиця 1. Забруднення повітря викидами автотранспорту біля досліджених паркових екосистем мегаполісу

Тест-полігони	Відстань від дороги, м	Кількість авто за добу, шт.	Сума забр. речовин, мг/м^2 *	NO _x	C _n H _m	C _n H	SO ₂
МП №1	4	2010,0	0,0861	0,41	0,52	0	0,02
МП №2	167						
ПП №1	7	2356,5	0,1161	2,11	2,86	0,01	0,13
ПП №2	276						
БЯ №1	4	4989,0	0,1763	2,28	3,38	0,01	0,14
БЯ №2	19						
ЛГ №1	26	6058,5	0,2109	2,3	3,05	0,03	0,19
ЛГ №2	617						

Примітка. БЯ – урочище Бабин Яр; ЛГ – заказник "Лиса Гора"; ПП – парк "Перемога"; МП – Маріїнський парк; * – що викидається у повітря за добу; NO_x, SO₂, C_nH_m (вуглеводні), C_nH (сажа) – концентрації фітотоксикантів, що викидає у повітря автотранспорт.

При аналізі методу ІФХ спостерігали зміни спектральних характеристик асиміляційного апарату листків *T. officinale* на градієнті аерогенного забруднення (рис. 2).

Криві Каутського які розташовані вище на графіку, характеризують фітоіндикатор, який зростає біля дороги з активним трафіком автотранспорту, нижні криві – рослини, які зростають у більш сприятливих екологічних умовах у центрі урбоєкосистем (рис. 2, табл.1).

Крива ІФХ відображає фізіологічний стан усього ланцюга фотосинтезу і кінетику його різних частин. Флуоресценцію хлорофілу, викликану слабким світлом при відкритих реакційних центрах після адаптації листків до темряви, позначають F_0 . У наших дослідженнях спостерігали тенденцію до збільшення F_0 на тест-полігонах, які розташовані біля автошляхів з різним рівнем навантаження транспорту, порівняно з біоіндикатором, який зростає у більш сприятливих умовах – у центрі парків (рис. 2, табл. 2). Найвищий рівень F_0 зафіксовано у листках рослин *T. officinale* на тест-полігоні БЯ № 1 ($269,87 \text{ у. о.}$), який розташований на відстані біля 4 м від міської дороги з навантаженням 4989 авто/год, і тест-полігоні МП № 1 ($252,89 \text{ у. о.}$) на узбіччі автошляхів (біля 4 м) з автотра-

фіком 2010 авто/год (табл. 2). Отже, при зростанні рослин біля міських доріг у їхніх ФСА відбуваються найбільші втрати енергії під час її міграції до РЦ та зменшується кількість молекул хлорофілу порівняно з рослинами, які зростають у центрі парків у більш сприятливих умовах. Найменший показник мають рослини, що зростають на тест-полігоні ЛГ № 2 ($F_0 = 221,54 \text{ у. о.}$), який міститься вище міської дороги завдяки особливостям ландшафту заказника "Лиса Гора" та має найбільшу відстань від автошляхів (біля 617 м, табл. 1, рис. 3).

Показник F_m вказує на максимальне значення флуоресценції хлорофілу а у листках рослин, що реєструється як максимум на індукційній кривій (рис. 2). У найменш сприятливих умовах зростання фітоіндикатора на тест-полігоні БЯ № 1, який розташований на відстані біля 4 м від автошляхів з активним трафіком, де сума забруднюючих речовин становить $0,1763 \text{ мг/м}^2$, зафіксовано найменший показник ($F_m = 1218,13 \text{ у. о.}$), також низький показник мають рослини кульбаби лікарської на тест-полігоні ЛГ № 1 ($F_m = 1472,56 \text{ у. о.}$) біля Стратегічного шосе з найбільшим навантаженням транспорту – 6058,5 авто/год (табл. 1, рис. 3).

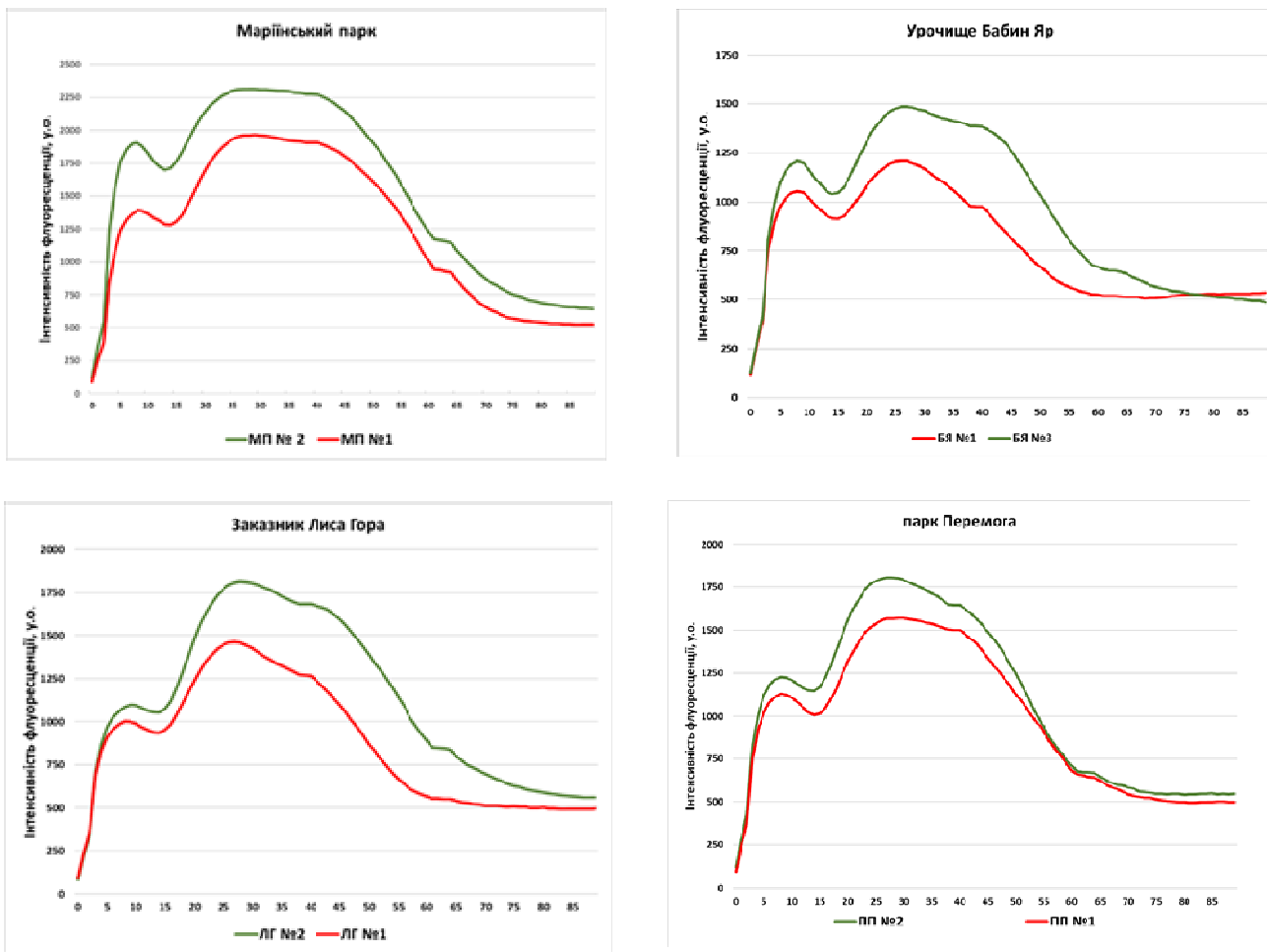


Рис. 2. Криві індукції флуоресценції хлорофілу у паркових екосистемах Києва за різного рівня забруднення повітря. Нижня крива – фітоіндикатор, який зростає біля дороги з активним трафіком автотранспорту; верхня – рослини, які зростають у більш сприятливих екологічних умовах у центрі урбоекосистем

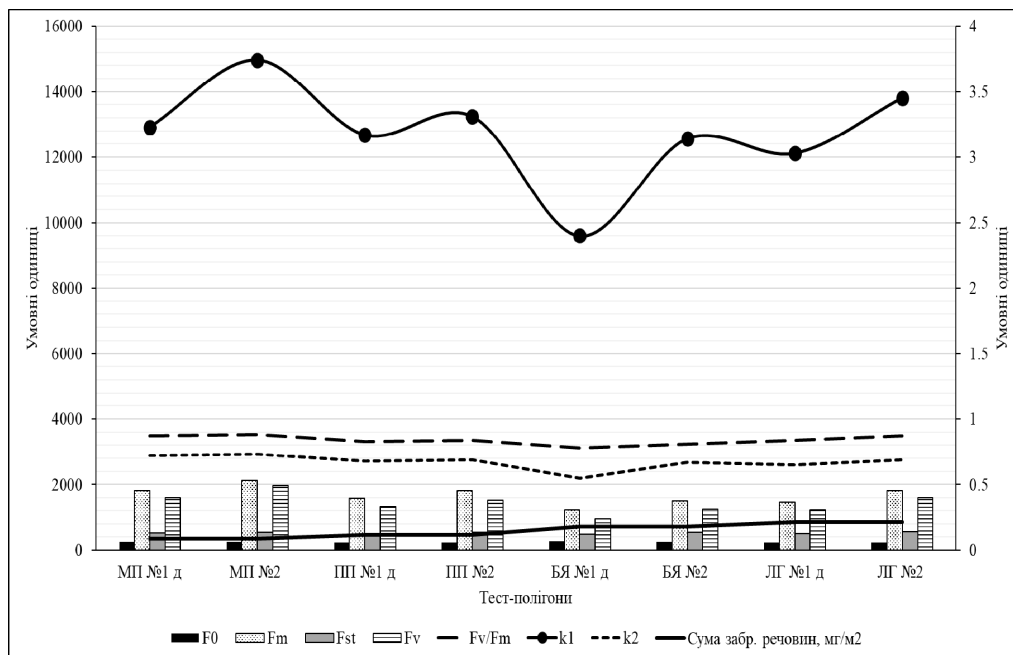


Рис. 3. Параметри флуоресценції хлорофілу у листках *T. officinale* за градієнтом аерогенного навантаження у паркових екосистемах мегаполісу ("д" позначено тест-полігони поблизу автошляхів)

Найвищі показники максимального значення індукції флуоресценції має фітоіндикатор, який зростає в більш комфортних екологічних умовах. Наприклад, у рослини *T. officinale* на тест-полігоні МП № 2 цей показник становить 2227,27 у. о.

Показник F_{st} – стаціонарний рівень флуоресценції за 3–4 хв після початку освітлення, показує кількість хлорофілів, які не беруть участі у передаванні енергії на реакційні центри. В умовах досліджених урбоекосистем мегаполісу в листках фітоіндикатора *T. officinale* цей показник становить від 484,81 (БЯ № 1) до 560,32 у. о. (ЛГ № 2, рис. 3).

При розрахунку варіабельної флуоресценції, яка характеризує функціонування ФСА, маємо найвищий показник $F_v = 1979,64$ у. о. (МП № 2), що зафіксовано у рослин *T. officinale*, які зростають на тест-полігоні з найменшим рівнем антропогенного навантаження (табл. 1, рис. 1, 3).

Величина F_v/F_m характеризує максимальну ефективність первинних процесів фотосинтезу, які залежать від фізіологічного стану рослин. У наших дослідженнях цей показник у рослин *T. officinale*, які зростають в умовах мегаполісу, різний і залежить від рівня аерогенного забруднення. Найменше значення (0,78) у хлоропластах живого листка зафіксовано на тест-полігоні № 1 в урочищі Бабин Яр, що є найбільш забрудненим викидами автотранспорту (табл. 1, 2).

Виявлено, що індикаторний показник впливу екзогенних чинників (k_1) знижується з підвищенням аерогенного забруднення паркових екосистем. При аналізі отриманих даних установлено, що найвищий показник $k_1 = 3,74$ має фітоіндикатор, який зростає на тест-полігоні № 2 у Маріїнському парку; найнижчий показник впливу екзогенних чинників $k_1 = 2,40$ мають рослини *T. officinale*, територія зростання яких розташована біля міських доріг з активним трафіком – БЯ № 1 (табл. 1, 2).

Для використуваного нами приладу "Флоратест" оптимальним значенням коефіцієнта індукції флуоресценції (k_2) є показник 0,70. Відповідно до отриманих даних, залежно від умов зростання, ефективність фотосинтезу у листках *T. officinale* здебільшого перебуває в оптимальних межах і становить від 0,73 до 0,69 (табл. 2). Однак на деяких тест-полігонах із вищим рівнем забруднення показник ІФХ дещо нижчий, він становить 0,55 (БЯ № 1) та 0,65 (ЛГ № 1).

Існує зворотний зв'язок між фотосинтетичними реакціями та індукцією флуоресценції хлорофілу. Нами досліджено зміни параметрів ІФХ залежно від рівня аерогенного навантаження на рослину-біоіндикатор в умовах мегаполісу. Як видно з рис. 2, умови зростання рослин *T. officinale* впливають на інтенсивність перебігу фотосинтетичних реакцій у живих листках фітоіндикатора. За активного фотосинтезу в умовах слабого освітлення використовується майже вся поглинута енергія, за оптимальних умов величина F_0 менша, ніж у трансформованому середовищі. Ми спостерігали тенденцію до зниження F_0 у фітоіндикатора *T. officinale*, який зростає у центрі парків, найбільша різниця показника F_0 (26,65 та 12,64 у. о.) зафіксована між тест-полігонами в урочищі Бабин Яр та заказником "Лиса Гора", відповідно. Це може свідчити про різний рівень антропогенного навантаження на рослини-біоіндикатори. Саме ці урбоекосистеми мають найбільший рівень забруднення повітря серед досліджених (див. табл. 1), отже, можемо припустити, що цей стресовий чинник викликає втрати енергії збудження під час міграції, а також зменшує кількість молекул хлорофілу.

Параметри F_m характеризують найвищий рівень флуоресценції рослин у живих листках. У нашому дослідженні цей показник найбільш варіабельний і становить від 1218,13 (БЯ № 1, тест-полігон має найбільше аерогенне навантаження) до 2127,27 у. о. (МП № 2, тест-полігон має найменший негативний вплив). Припускаємо, що це зумовлено адаптивними змінами у структурі пігментного комплексу рослини-біоіндикаторів. Значення F_m зменшується у рослин *T. officinale*, які зростають біля дороги. Наприклад у заказнику "Лиса Гора" різниця становить 351,60 у. о., у парку "Перемога" – 230,39, в урочищі Бабин Яр – 287,51, на тест-полігонах у Маріїнському парку – 302,46 у. о. Зменшення показника F_m , імовірно, пов'язане з руйнуванням структури хлоропластів та зменшенням їх кількості під впливом зовнішнього середовища.

Вважають, що чим вище показники інтенсивності фотохімічних реакцій, тим кращі умови для функціонування ФСА рослин. У наших дослідженнях установлено, що найгірші умови для функціонування ФСА мають рослини кульбаби лікарської, які зростають на тест-полігонах біля автошляхів з найбільшим навантаженням автотранспорту. Наприклад, на тест-полігоні БЯ № 1, який міститься на відстані 4 м від дороги, автотрафік становить 4989 авто/год, на тест-полігоні ЛГ № 1, який розташований на узбіччі Стратегічного шосе, – 6058,5 авто/год, тому на цих ділянках показник інтенсивності фотохімічних реакцій найменший – $F_v = 948,27$ та $F_v = 1217,81$ у. о., відповідно.

Ефективність фотосинтезу, як і величина F_v/F_m , змінюється за багатьма факторами: зміни температури повітря, засолення, дефіцит мінерального живлення, дія токсичних речовин, важких металів, техногенних поллютантів тощо тощо [16, 21]. Величина F_v/F_m у ФС2 листків рослин *T. officinale*, які зростають в умовах мегаполісу, різна і залежить від рівня аерогенного забруднення. Найвищий показник від 0,88 до 0,84 фотохімічних окиснювально-відновлювальних процесів має ФСА рослин *T. officinale*, які зростають у більш сприятливих екологічних умовах на тест-полігонах МП № 2, ПП № 2. Дещо знижені показники (від 0,83 до 0,78) зафіксовано у листках кульбаби лікарської на тест-полігонах ПП № 1 та БЯ № 1, які мають вищий рівень забруднення повітря, що може свідчити про вплив аерогенного навантаження на інтенсивність фотосинтезу. Таку саму тенденцію змін у функціонуванні ФСА деревних рослин описують Шепелюк, Ковалевський, Китаєв, Лукаткин, Ревин, Башмаков, Кренделєва, Антал, Рубин та ін. [22, 23].

На градієнті аерогенного забруднення на досліджених територіях індикаторний показник впливу зовнішніх факторів (k_1) змінюється. Встановлено, що у паркових екосистемах мегаполісу коефіцієнт k_1 перебуває у межах 2,40–3,74, тобто з погіршенням умов зростання, а саме збільшенням аерогенного навантаження на асиміляційний апарат рослин, показник k_1 зменшується на 35,0 %.

Оптимальним значенням коефіцієнта індукції флуоресценції (k_2) є показник 0,70, який характеризує оптимальний фізіологічний стан рослин, що зростають у хороших екологічних умовах. У наших дослідженнях цей коефіцієнт має найвищий показник 0,73 на тест-полігоні у Маріїнському парку, де тиск аерогенного навантаження на ФСА рослин *T. officinale* є найнижчим (див. табл. 1), і знижується на 24,6 % з погіршенням умов зростання фітоіндикатора на тест-полігоні № 1 в урочищі Бабин Яр з найбільшим навантаженням автотранспорту. Таку тенденцію змін коефіцієнта індукції флуоресценції (k_2) у живих листках *T. cordata* Mill. у

несприятливих умовах техногенно сформованих едафотопів описали Олексійченко, Китаєв та ін. [25].

Для об'єктивного оцінювання залежності стану ФСА рослин *T. officinale* на градієнті аерогенного забруднення нами проведено кореляційний аналіз (табл. 2) та з'ясовано залежність таких кінетичних параметрів: F_0 ,

що демонструє інтенсивність флуоресценції хлорофілу при відкритих реакційних центрах; F_m – максимальна флуоресценція при закритих РЦ; F_v – варіабельна флуоресценція та параметр F_v/F_m , який характеризує вплив стресових чинників на рослину, від впливу окремих аерозабрудників NO_x , SO_2 , C_nH_m , C_nH .

Таблиця 2. Кореляційні залежності показників стану ФСА та рівня аерогенного забруднення

	F_0	F_m	F_{st}	F_v	F_v/F_m	k_1	k_2	Кількість авто, шт.	Сума забр. речовин, мг/м ²	NO_x	CH	C_nH	SO_2
F_0	1												
F_m	-0,34	1											
F_{st}	-0,58	0,72	1										
F_v	-0,35	1,00	0,71	1									
F_v/F_m	-0,52	0,89	0,62	0,92	1								
k_1	-0,37	0,91	0,64	0,92	0,89	1							
k_2	-0,51	0,87	0,67	0,88	0,88	0,98	1						
Кількість авто, шт.	-0,27	-0,56	-0,12	-0,53	-0,35	-0,60	-0,54	1					
Сума забр. речовин, мг/м ²	-0,33	-0,59	-0,13	-0,56	-0,38	-0,63	-0,55	0,99	1				
NO_x	-0,30	-0,71	-0,21	-0,72	-0,64	-0,74	-0,61	0,69	0,78	1			
C_nH_m	-0,20	-0,75	-0,24	-0,77	-0,72	-0,79	-0,66	0,69	0,77	0,99	1		
C_nH	-0,65	-0,33	0,00	-0,30	-0,04	-0,37	-0,25	0,84	0,88	0,70	0,63	1	
SO_2	-0,47	-0,61	-0,14	-0,60	-0,43	-0,64	-0,51	0,81	0,89	0,95	0,92	0,89	1

Результати показали високий рівень зворотного кореляційного зв'язку між показниками максимальної флуоресценції хлорофілу у живих листках рослин *T. officinale* з деякими забруднюючими речовинами: NO_x ($r = -0,71$), C_nH_m ($r = -0,75$, табл. 2).

Найбільш вагомим щодо дії аерогенного забруднення виявився показник впливу екзогенних чинників (k_1) на функціонування ФСА, який має високий зворотний кореляційний зв'язок ($r = -0,60$) з показником кількості авто/год, сумою забруднюючих речовин ($r = -0,63$) NO_x ($r = -0,74$), SO_2 ($r = -0,64$), C_nH_m ($r = -0,79$).

Загалом встановлено високу фоточутливість асиміляційного апарату рослин *T. officinale* до різного рівня забруднення повітря в умовах мегаполісу, тому показники індукції флуоресценції хлорофілу можуть бути використані в екологічному оцінюванні навколишнього природного середовища.

Висновки. Встановлено інформативність методу індукції флуоресценції хлорофілу для біоіндикації в умовах аеротехногенного впливу на прикладі рослин *T. officinale* за параметрами F_0 , F_m , F_{st} , F_v , F_v/F_m та k_1 , k_2 , які можна використовувати як тестові показники для визначення стійкості рослин до впливу несприятливих чинників.

Фоточутливість листків *T. officinale*, яка свідчить про фізіологічний стан рослин, знижується з підвищенням аерогенного забруднення на досліджених тест-полігонах мегаполісу. Встановлено, що максимальну інтенсивність фотосинтезу мають рослини *T. officinale*, які зростають у більш сприятливих екологічних умовах.

Отже, використання приладу "Флоратест" для визначення стану рослин за різного рівня аеротехногенного навантаження є перспективним і потребує подальших досліджень.

Список використаних джерел

1. Chemerys I. Chemerys Effect of vehicle emissions on the morphological and physiological changes of *Taraxacum officinale* Web. / I. Chemerys, O. Myslyuk // Ukrainian Journal of Ecology. – 2020. – 10(1). – С. 7–17. – doi: 10.15421/2020_2.

2. Ханнанова О. Р. Біоіндикаційна оцінка стану атмосферного повітря полтавського міського парку / О. Р. Ханнанова, А. А. Арканова // Біологія та екологія. – 2017. – Т. 3, № 1–2. – С. 69–75. – http://dspace.pnpu.edu.ua/handle/123456789/9899.

3. Мирошник Н. В. Оценка техногенной нагрузки в пределах мегаполиса с помощью комплекса методов биоиндикации на примере г. Киева / Н. В. Мирошник // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2018. – Т. XXIX, № 3. – С. 107–129. – doi: 10.21513/0207-2564-2018-3-107-129.

4. Мирошник Н. В. Экологическое зонирование территорий с учетом роли сохранившихся естественных экосистем (на примере г. Киева) / Н. В. Мирошник, И. К. Тесленко // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2018. – Т. 27, № 4(2). – С. 32–40. – doi: 10.24411/2073-1035-2018-10133. – https://elib.pnzgu.ru/files/eb/WinX2KeyYbcCB.pdf

5. Наукові основи інтегрального оцінювання паркових лісових екосистем в умовах великого міста : метод. рекомендації / В. В. Лавров, Н. В. Мірошник, Т. В. Шупова та ін. ; під заг. ред. В. В. Лаврова. – К., 2021. – http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/5891

6. Біоіндикація стану техногенного забруднення м. Києва: методичні підходи / Г. Ю. Гончар, Г. А. Гродзинська, С. М. Конякин та ін. ; за заг. ред. О. П. Дмитрієва. – К. : Нап формат, 2016.

7. Морозова Т. В. Скринінг палиноморфологічного та палінотоксичного ефекту автотранспортних емісій / Т. В. Морозова, В. О. Хрутьба, О. П. Кобзиста // Вісник Національного транспортного університету. Серія "Технічні науки". – 2019. – Вип. 1(43). – С. 116–126. – http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vntu_2019_1_14

8. Using of *Taraxacum officinale* (L.) pollens for the urban park bioindication / M. Mazura, N. Miroshnyk, I. Teslenko et al. // Ukrainian Journal of Ecology. – 2020. – Vol. 10(5). – P. 49–53. – doi: 10.15421/2020_205

9. Мазура М. Ю. Біоіндикація паркових екосистем г. Києв по реакції пильці *Taraxacum officinale* Wigg. / М. Ю. Мазура // Самарская Лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2021. – Т. 30. – С. 31–35. – doi: 10.24412/2073-1035-2021-10372

10. Спектрофотометричний експрес-метод біоіндикації паркових екосистем / В. Б. Небесний, Г. А. Гродзинська, А. І. Самчук та ін. // Nauka innov. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 78–86. – https://doi.org/10.15407/scin16.04.078

11. Аналіз чутливості пилку рослин *Canna* L. в умовах аеротехногенного пресингу / М. Ю. Мазура, О. М. Лещенюк, І. К. Тесленко, М. І. Юрчук // Екологічні науки. – 2020. – № 3(30). – С. 182–187. – doi: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.30

12. Green infrastructure and relationship with urbanization / N. V. Miroshnyk, A. F. Likhonov, T. O. Grabovska et al. // Importance and necessity of integrated governance, Land Use Policy. – 2022. – Vol. 114. – P. 105941. – https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105941.

13. Bioindication of megalopolis park ecosystems under aerotechnogenic loading. Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry / N. V. Miroshnyk, T. O. Grabovska, M. Mazura, I. K. Teslenko. – 2022. – Vol. 64(1). – P. 15–37. – doi: 10.2478/ffp-2022-0003.

14. Лещенюк О. М. Зміна анатомічних показників листків *Forsythia Euroroea* Degen & Bald. за дії викидів автотранспорту / О. М. Лещенюк, М. Ю. Мазура // Науковий вісник НЛТУ України. – 2021. – Т. 31, № 5. – С. 29–35. – https://doi.org/10.36930/40310504

15. Rohacek K. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters, and some applications / K. Rohacek, M. Bartak // Photosynthetica. – 2000. – 37, №3. – P. 339–363.

16. Антонова Г. В. Дослідження залежності індукції флуоресценції хлорофілу від температури та розташування сенсора на рослині

/ Г. В. Антонова, О. В. Ковирьова, В. М. Лаврентьев // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2015. – № 14. – С. 90–100. – http://www.dasd.com.ua/kzms/2015/2015_st11.pdf

17. Мазура М. Ю. Діагностика функціонального стану фотосинтетичного апарату *Taraxacum officinale* (L.) Weber ex F.H. Wigg. методом індукції флуоресценції хлорофілу : зб. статей. / Міжнар. наук. конф. "Охорона біорізноманіття історико-культурної спадщини у ботаничних садах та дендропарках"; присвячена 225-річчю заснування нац. дендролог. парку "Софіївка" НАН України (29-30 вересня 2021 р.) / М. Ю. Мазура, Н. В. Мірошник, І. К. Тесленко. – С. 203–208. – <http://mchr.sofievka.org/issue/view/14825>

18. Костенко С. М. Індукція флуоресценції хлорофілу листків представників роду *Philadelphus* L. в умовах міста Києва / С. М. Костенко, О. І. Китаєв, С. Б. Ковалевський // Науковий вісник НЛТУ України. – 2014. – http://nltu.edu.ua/nv/Archive/2014/24_4/209_Kost.pdf

19. Zhou Y.-H. Effects of sustained chilling and low light on das exchange, chlorophyll fluorescence quenching and absorbed light allocation in cucumber leaves / Y.-H. Zhou, L.-F. Huang, J.-Q. Yu // J. Plant Physiol. Molec. Biol. – 2004. – Vol. 30, № 2. – P. 153–160.

20. Kalaji M. H. Chlorophyll fluorescence: A useful tool in barley plant breeding programs. In: Photochemistry Research Progress (Eds. A. Sanchez, S. J. Gutierrez) / M. H. Kalaji, P. Guo // Nova Publishers. – NY, USA, 2008. – P. 439–463. – doi:10.1089/omi.2011.0070

21. Євтушенко Ю. В. Діагностика функціонального стану фотосинтетичного апарату *Aesculus carnea* Наупе методом індукції флуоресценції хлорофілу / Ю. В. Євтушенко, С. Б. Ковалевський, О. І. Китаєв // Лісове і садово-паркове господарство. – 2016. – № 10. – <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/8940>

22. Шепелюк М. О. Флуоресценція хлорофілу та її індукційні зміни в листках деревних рослин в умовах урбанізованого середовища міста Луцька / М. О. Шепелюк, С. Б. Ковалевський, О. І. Китаєв // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Вип. 26.5. – С. 102–109. – http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntu_2017_27.1_24

23. Экологическая оценка состояния древесных растений г. Саранска по флуоресценции хлорофилла / А. С. Лукаткин, В. В. Ревин, Д. И. Башмаков и др. // Поволжский экологический журнал. – 2011. – № 1. – С. 87–92. – <https://studylib.ru/doc/2561171/e-kologicheskaya-ocenka-sostoyaniya-drevesnyh>

24. Романов В. О. Сімейство портативних приладів "Флоратест": підготовка до серійного виробництва / В. О. Романов, Д. М. Артеменко, Ю. О. Браїко // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2011. – № 10. – С. 85–93. – <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/46456>

25. Особливості індукції флуоресценції хлорофілу в листках деревних рослин в умовах урбанізованого середовища / Н. О. Олексійченко, О. І. Китаєв, М. О. Совакова та ін. // Біоресурси і природокористування. – 2013. – Т. 5, № 5–6. – С. 107–112. – http://nbuv.gov.ua/UJRN/bpc_2013_5_5-6_14

26. Bioindication of megalopolis park ecosystems under aerotechnogenic loading / N. V. Miroshnyk, T. O. Grabovska, M. Mazura, I. K. Teslenko // Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry. – 2022. – Vol. 64 (1). – P. 15–37. – doi: 10.2478/ffp-2022-0003.

Reference

1. Chemerys I., Myslyuk O., Chemerys V. Effect of vehicle emissions on the morphological and physiological changes of *Taraxacum officinale* Web. Ukrainian Journal of Ecology. 2020. 10(1):7-17. DOI: 10.15421/2020_2

2. Hannanova O. R., Arkanova A. A. Bioindication assessment of the state of atmospheric air of Poltava city park. Biology and ecology. 2017. 3. (1–2):69–75. <http://dspace.pnpu.edu.ua/handle/123456789/9899>

3. Miroshnik N. V. Assessment of technogenic load within the metropolis using a set of bioindication methods using the example of Kyiv. Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems. Moscow. 2018. 29(3): 107–129. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-3-107-129

4. Miroshnik N. V., Teslenko I.K. Ecological zoning of territories, taking into account the role of preserved natural ecosystems (on the example of Kyiv). Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology. Samara. 2018. T.27. 4(2):32–40. DOI: 10.24411/2073-1035-2018-10133/<https://elib.pnzgu.ru/files/eb/WinX2KeYbcCB.pdf>

5. Lavrov V. V., Miroshnik N. V., Shupova T. V., Teslenko I. K., Gonchar G. Yu. Scientific foundations of the integral assessment of park forest ecosystems in the minds of a great place. Methodical recommendations. Kyiv. 2021. 68p. <http://rep.btsau.edu.ua/handle/BNAU/5891>

6. Gonchar G. Yu., Grodzinska G. A., Konyakin S. M., Miroshnik N. V., Mikhiev O. M., Nebosny V. B., Samchuk A. I., Teslenko I. K., Schur Yu. K. Bioindication of the state of man-made pollution in Kyiv: methodological approaches. Kyiv. 2016. 122p. <https://www.researchgate.net/profile/Neboisnyi-Vitaliy-2/publication/319173270>

7. Morozova T.V., Khrutba V.O., Kobzista O.P. Screening of palynomorphological and palynotoxic effects of motor transport emissions. Bulletin of the National Transport University. "Technical Sciences" series. 2019.1(43) : 116–126. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vntu_2019_1_14

8. Mazura M., Miroshnyk N., Teslenko I., Grabovska T., Rozputnii O., Mazur T., Polishchuk Z., Oleshko O. Using of *Taraxacum officinale* (L.) pollens for the urban park bioindication. Ukrainian Journal of Ecology. 2020. V. 10(5): 49–53. DOI: 10.15421/2020_205

9. Mazura M. Bioindication of park ecosystems in Kyiv according to the pollen reaction of *Taraxacum officinale* Wigg Samarskaya Luka: problems of regional and global ecology. Samara. 2021. 30:31–35. DOI: 10.24412/2073-1035-2021-10372

10. Heavenly V.B., Grodzinska G.A., Samchuk A.I., Dugin S.S., Gonchar G.Yu. Spectrophotometric express method for bioindication of park ecosystems. Science innovation. Nauka innov. 2020. 16(4):78–86. <https://doi.org/10.15407/scin16.04.078>

11. Mazura M. Yu., Leshchenyuk O. M., Teslenko I. K., Yurchuk M. I. Analysis of the sensitivity of *Canna* L. roslin in the minds of aerotechnogenic pressure. Ecological sciences. 2020. 3(30):182–187. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.30>

12. Miroshnyk N. V., Likhhanov A. F., Grabovska T. O., Teslenko I. K., Roubik H. Green infrastructure and relationship with urbanization – Importance and necessity of integrated governance. Land Use Policy, 2022. Volume 114, 105941, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105941>. Miroshnyk N.V., Grabovska T.O., Mazura M., Teslenko I.K. Bioindication of megalopolis park ecosystems under aerotechnogenic loading. Folia Forestalia Polonica, Series A Forestry, 2022, Vol. 64 (1), 15–37. DOI: 10.2478/ffp-2022-0003.

13. Miroshnyk N.V., Grabovska T.O., Mazura M., Teslenko I.K. Bioindication of megalopolis park ecosystems under aerotechnogenic loading. Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry, 2022.64(1):15–37. DOI: 10.2478/ffp-2022-0003.

14. Leshchenyuk O.M., Mazura M.Yu. Change of anatomical indications in leaflets of *Forsythia Europaea* Degen & Bald. for dividing vehicles. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. 2021.31(5):29–35. <https://doi.org/10.36930/40310504>

15. Rohacek K., Bartak M. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters, and some applications. Photosynthetica. 2000. 37(3):339–363.

16. Antonova G. V., Koviryova O. V., Lavrentiev V. M. Further study of the deposition of fluorescence induction of chlorophyll depending on the temperature and degreasing of the sensor on roslin. Computers and systems. 2015. 14:90–100. Режим доступу: http://www.dasd.com.ua/kzms/2015/2015_st11.pdf

17. Mazura M.Yu., Miroshnik N.V., Teslenko I.K. Diagnostics of the functional state of the photosynthetic apparatus *Taraxacum officinale* (L.) Weber ex F.H. Wigg. chlorophyll fluorescence induction method. Collection of articles. Intern. Sciences. conf. "Protection of biological change of historical and cultural decline in botanical gardens and arboretums". Assigned to the 225th anniversary of the National Dendrological Park "Sofiyivka" of the National Academy of Sciences of Ukraine. (September 29-30, 2021): 203–208. <http://mchr.sofievka.org/issue/view/14825>

18. Kostenko S. M., Kitaev O. I., Kovalevsky S. B. Fluorescence induction of leaf chlorophyll in representatives of the genus *Philadelphus* L. in the minds of the city of Kiev. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. 2014. http://nltu.edu.ua/nv/Archive/2014/24_4/209_Kost.pdf

19. Zhou Y.-H., Huang L.-F., Yu J.-Q. Effects of sustained chilling and low light on das exchange, chlorophyll fluorescence quenching and absorbed light allocation in cucumber leaves. J. Plant Physiol. Molec. Biol. 2004. Vol.30(2):153–160. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15599040/>

20. Kalaji MH, Guo P Chlorophyll fluorescence: A useful tool in barley plant breeding programs. In: Photochemistry Research Progress (Eds. A. Sanchez, S. J. Gutierrez). Nova Publishers, NY, USA. 2008. 439–463. DOI: 10.1089/omi.2011.0070

21. Yevtushenko Yu. V., Kovalevsky S. B., Kitaev O. I. Diagnostics of the functional state of the photosynthetic apparatus of *Aesculus carnea* Hayne by chlorophyll fluorescence induction. Forest and garden and park state. 2016.10. <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/8940>

22. Shepelyuk M. O., Kovalevsky S. B., Kitaev O. I. Fluorescence of chlorophyll and inductive changes in the leaves of the villages of roslin in the minds of the urban center of the town of Lutsk. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine. Lviv. 2017. 26(5):102–109 http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntu_2017_27.1_24

23. Lukatkin A. S., Revin V. V., Bashmakov D. I., Krendeleva T. E., Antal T. K., Rubin A. B. Ecological assessment of the state of woody plants in the city of Saransk by chlorophyll fluorescence. Volga ecological journal. Saransk. 2011.1: 87–92 <https://studylib.ru/doc/2561171/e-kologicheskaya-ocenka-sostoyaniya-drevesnyh>

24. Romanov V. O., Artemenko D. M., Braiko Yu. O. Family of portable devices "Floratest": preparation for serial production. Computing systems, merezh that system. Kyiv. 2011.10:85–93 <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/46456>

25. Miroshnyk N.V., Grabovska T.O., Mazura M., Teslenko I.K. Bioindication of megalopolis park ecosystems under aerotechnogenic loading. Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry, 2022.64(1):15–37. DOI: 10.2478/ffp-2022-0003.

Надійшла до редколегії 3.03.2022
Отримано виправлений варіант 3.04.2022
Підписано до друку 3.04.2022

Received in the editorial 3.03.2022
Received version on 3.04.2022
Signed in the press on 3.04.2022

M. Mazura, PhD of Biological Sciences, Researcher,
N. Mlirishnuyk, PhD of Biological Sciences, Senior Researcher,
I. Teslenko, Leading Engineer
Institute for Evolution Ecology of the NAS, Ukraine

SENSITIVITY OF THE PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF PLANTS TARAXACUM OFFICINALE (L.) WEBER EX F.H.WIGG. IN A METROPOLIS

The paper presents a comparative assessment of the functional state of the pigment complex of living plant leaves Taraxacum officinale (L.), growing in the park ecosystems of Kyiv with different levels of air pollution.

Dandelion (Taraxacum officinale (L.) Weber ex F.H. Wigg.) was chosen as a phytoindicator for research in park ecosystems of Kyiv, because it is a common, most unpretentious roadside plant in the metropolis. To obtain data on the influence of factors on the photosynthetic apparatus T. officinale used a portable fluorometer "Floratest", developed by the Institute of Cybernetics. V.M. Glushkova National Academy of Sciences of Ukraine. According to the results of studies of changes in the induction of chlorophyll fluorescence in the leaves, characterizing the efficiency of photochemical processes on the gradient of air pollution, the most significant were: F_m – maximum fluorescence, F_v – variable fluorescence, its level is an indicator of photochemical redox processes and k_1 – indicator of the impact of exogenous factors on plants that have a high inverse correlation with indicators of aerogenic pollution. These indicators indicate the photosensitivity of the assimilation apparatus of plants T. officinale to the conditions of growth and the possibility of using their values in bioindication studies of the environment.

Keywords: aerogenic load, phytoindicator, chlorophyll fluorescence, park ecosystems.