

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

УДК 581.132.1:581.5: 712.4 : 582.971.1 (477-25)

**ФУНКЦІОНАЛЬНА ДІАГНОСТИКА АДАПТИВНОСТІ
ІНТРОДУКОВАНИХ ВИДІВ РОДУ СНІЖНОЯГІДНИК
(*SYMPHORICARPOS DUHAMEL*) В УМОВАХ КИСЬВА**

Р. Ю. МАМОНОВА, здобувач

Національний ботанічний сад ім. М. М. Гришка НАН України

E-mail: rina_u@ukr.net

О. І. КИТАЄВ, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник

Інститут садівництва НАН України

E-mail: O_kitaev@i.ua

Г. М. ШИХАЛЄЄВА, кандидат хімічних наук

Фізико-хімічний інститут захисту навколишнього середовища і людини

МОН України та НАН України

С. І. СЛЮСАР, кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник

Ботанічний сад Національного університету біоресурсів і

природокористування України

E-mail: ekosocio@gmail.com

Ю. С. КОЛЕСНИК, науковий співробітник

Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України

Анотація. Вивчені сезонні зміни параметрів індукції флуоресценції хлорофілу листків рослин 9 видів роду сніжноягідник (*Symphoricarpos Duhamel*): *S. albus* (L.) S.F.Blake, *S. ×chenaultii* Rehder, *S. ×doorenbosii* Krüssm., *S. hesperius* G.N.Jones, *S. mollis* Nutt., *S. occidentalis* Hook., *S. orbiculatus* Moench, *S. oreophilus* A.Gray, *S. rivularis* Suksd. Для оцінки функціонального стану зелених рослин використано метод який ґрунтується на вивченні взаємозв'язку змін інтенсивності флуоресценції хлорофілу з фотосинтетичними реакціями в хлоропластах листків. З метою реєстрації флуоресценції та її індукційних змін у польових умовах застосовано портативний прилад – хронофлуорометр «Флоратест» (виробництва Інженерного центру Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України). Аналіз вмісту металів-забруднювачів в різних частинах рослин сніжноягідника білого (*S. albus*), проводили з використанням методу атомно-абсорбційної спектроскопії. В листках більшості видів виявлено високу стабільність фотосинтетичних процесів, що дозволяє рослинам зберігати свою декоративність тривалий період. Порівняльний аналіз накопичення металів-забруднювачів і параметрів індукції флуоресценції

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

хлорофілу найбільш поширеного виду *S. albus*, дозволив визначити рівень стійкості представників виду до дії негативних чинників міського середовища (він є достатньо високим). При цьому встановлено негативний вплив екстремальних умов на активність реакційних центрів і ефективність темнових фотохімічних процесів у хлоропластах листків.

Результати досліджень дозволяють рекомендувати попередньо випробувані в умовах міста Києва види інтродукованих сніжноягідників для використання в насадженнях мегаполісів й зокрема у місцях з підвищеним рівнем техногенного забруднення.

Ключові слова: інтродуковані сніжноягідники, *Symphoricarpos*, міське середовище, метали-забруднювачі, функціональна діагностика адаптивності, індукція флуоресценції хлорофілу, атомно-абсорбційна спектроскопія.

Актуальність. Важливою умовою покращення довкілля є мобілізація і широке впровадження інтродукованих дерев та кущів, які пройшли успішне первинне випробування в ботанічних і дендрологічних садах виявивши ознаки високої декоративності. Такими перспективними, але поки що малопоширеними рослинами є сніжноягідники, котрі відрізняються високою декоративністю та привабливістю впродовж майже усього вегетаційного періоду, що особливо важливо при створенні міських ландшафтних композицій.

З близько 18 видів родового комплексу *Symphoricarpos* на сьогодні в Україні випробувано 9 видів. У насадженнях населених місць зустрічається переважно *S. albus*. Представники інших видів зростають переважно у ботанічних колекціях. При цьому посухостійкість та посухостійкість більшості видів (за результатами польових і лабораторних досліджень) для успішного їх використання в умовах Києва є достатньою [8]. Спостереження за розвитком сніжноягідників у вуличних ландшафтах Києва виявили достатньо високу стійкість рослин до умов мегаполісу, що спонукало провести дослідження його функціонального стану також в місцях з найбільш інтенсивним транспортним рухом. Особливістю сніжноягідників є наявність цінних декоративних ознак у рослин практично впродовж всієї вегетації [9].

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

Листок вищих рослин, у тому числі й сніжноягідників, являє собою складну оптичну систему, яка має здатність з високою ефективністю використовувати сонячну енергію. Поглинання квантів світла у видимій частині спектра (400–700 нм), тобто у червоних і синіх променях, здійснюється високоспеціалізованими оптичними поєднаннями – хлорофілом *a* і хлорофілом *b*. Більшість з них включена до складу світлозбиральних комплексів (СЗК), які забезпечують поглинання і передачу світлової енергії на реакційні центри (РЦ). Енергія випромінювання, яке поглинуте у первинних процесах фотосинтезу, перетворюється на хімічну енергію, а не засвоєне хлорофілами світло – випромінюється (флуоресціює). Живі листки за умов переходу від темряви до світла змінюють інтенсивність флуоресценції хлорофілу в часі. Це явище було назване індукцією флуоресценції хлорофілу (ІФХ) [5].

Останнім часом для аналізу стану зелених рослин все ширше використовують метод Каутського [1], що ґрунтується на взаємозв'язку змін інтенсивності флуоресценції хлорофілу з фотосинтетичними реакціями в хлоропластах листків [2, 3]. Флуоресценція хлорофілу та її індукційні зміни легко реєструються, що дозволило створити портативні прилади для визначення функціонального стану рослин у польових умовах [4, 5].

Функціональний стан рослин оцінювали аналізуючи індукційні зміни флуоресценції хлорофілу листків з використанням портативного хронофлуорометра «Флоратест», що дозволяло контролювати роботу фотосистеми 2 (ФС II) хлоропластів [6]. Паралельно визначали вміст металів-забруднювачів з використанням методу атомно-абсорбційної спектроскопії [7].

Мета дослідження полягала у визначення функціонального стану і фотосинтетичного потенціалу рослин різних видів роду сніжноягідник (*Symphoricarpos Duhamel*) в умовах мегаполісу.

Матеріали та методи дослідження. Оцінку стану пігментної системи з допомогою методу індукції флуоресценції хлорофілу проводили у другій половині літа (липень-серпень) 2017 року, коли листові пластинки повністю сформувалися. Виходили з того що у більшості рослин в ході онтогенезу саме в

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

цей час спостерігається суттєве зниження функціональної активності [10, 11]. Об'єктами досліджень були рослини види роду *Symphoricarpos*: сніжноягідник білий (*S. albus* (L.) S.F.Blake), с. вечірній (*S. hesperius* G.N.Jones), с. Доренбоза (*S. ×doorenbosii* Krüssm.), с. Шено (*S. ×chenaultii* Rehder), с. м'який (*S. mollis* Nutt.), с. округлий (*S. orbiculatus* Moench), с. гірський (*S. oreophilus* A.Gray), с. західний (*S. occidentalis* Hook.), с. прирічковий (*S. rivularis* Suksd.), які попередньо випробувані в Національному ботанічному саду ім. М. М. Гришка НАН України і досягли репродуктивного віку. Для контролю було обрано найпоширеніший в умовах Києва *S. albus*.

Для дослідів були використані повністю сформовані листки (4–5 листок від морфологічної верхівки пагону). Їх, як правило, відбирали зранку, в день проведення вимірювань та за необхідності перед аналізом витримували в темноті не менше 30 хвилин.

Індукційні зміни флуоресценції хлорофілу реєстрували з допомогою хронофлуорометра «Флоратест», виробництва Інженерного центру Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України. Дослідження проводили в лабораторії фізіології Інституту садівництва НААН України. Для інтегральної оцінки стану фотосинтетичного апарату методом ІФХ листок сніжноягідника розташовували між пластинами виносного оптичного сенсора приладу «Флоратест». Флуоресценцію хлорофілу збуджували і реєстрували з верхньої поверхні листа (паліадна паренхіма) на протязі 3 хвилин, по закінченню яких на рідкокристалічному моніторі приладу отримували графік. Надалі данні з приладу передавали на комп'ютер.

Для оцінювання функціонального стану фотосинтетичного апарату за індукційними змінами флуоресценції хлорофілу використано комплекс параметрів, що дозволило проаналізувати зміни фотосинтетичних процесів у листках, а саме:

F_o – початкове значення, або фоновий рівень флуоресценції (після ввімкнення освітлення), пропорційне кількості молекул хлорофілу, які не

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

мають функціонального зв'язку з реакційними центрами (РЦ) і не передають енергію на фотосинтез;

F_{pL} – рівень флуоресценції хлорофілу на момент досягнення тимчасового вповільнення зростання її сигналу (так зване «плато»);

F_{p1} – значення емісії флуоресценції (у першому максимумі ІФХ), яке пропорційне загальній кількості хлорофілів у межах фотосистеми та обернено пропорційне кількості РЦ;

F_{p2} – значення емісії флуоресценції у додатковому максимумі індукції флуоресценції хлорофілу;

F_{st} – стаціонарний її рівень через 1,5–3 хвилини після початку освітлювання (показник кількості хлорофілів, які не беруть участь у передачі енергії на РЦ).

Інші показники що характеризують перебіг фотосинтетичних процесів в листках визначали аналітичним шляхом за формулами:

K_{pL} – так званий «коефіцієнт плато», який характеризує частку первинних акцепторів електронів за насичуючий фотосинтез інтенсивності світла ФСП – Q_a , що не відновлюють реакційні центри: $K_{pL} = \Delta F_{pL} / F_v$, $\Delta F_{pL} = F_{pL} - F_o$, $F_v = F_{p1} - F_o$;

K_1 – коефіцієнт ефективності світлової фази фотосинтезу та електронного транспорту поблизу реакційних центрів фотосистеми 2 (ФСІІ): $K_1 = F_v / F_{p1}$;

K_2 – коефіцієнт ефективності темнових фотохімічних процесів, або коефіцієнт спаду флуоресценції (*Rfd*), який характеризує квантову ефективність фотосинтезу (індекс життєздатності): $K_2 = (F_{p2} - F_{st}) / F_{st}$.

Всі показники фотоіндукції флуоресценції представлено у відносних одиницях еталону флуоресценції (скло ОС-14) з емісією у такому самому спектральному діапазоні, як і флуоресценція хлорофілу.

У спеціальному досліді також проаналізований вплив на функціональний стан рослин сніжноягідника білого (*S. albus*) металів забруднювачів у міських умовах з підвищеним рівнем токсикогенного навантаження в районі Севастопольської площі (поблизу від автомагістралі з інтенсивним рухом транспорту). Зразки відбирали на відстані 0,5 м, 1,0 м и 10 м від магістралі. За

Мамонова Р. Ю., Китасв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

контроль брали зразки з паркової зони, що знаходиться на території Інституту садівництва НААН України.

Аналіз вмісту металів-забруднювачів, в різних частинах рослин сніжноягідника білого, проводили з використанням методу атомно-абсорбційної спектроскопії.

Приготування біопроб здійснювали методом озолення в муфельній печі, з наступним екстрагуванням в азотній кислоті. Визначення вмісту металів у підготованих фільтратах здійснювали з використанням полум'яної атомізації (у разі визначення великих кількостей) на спектрофотометрі «С115-М1» та електротермічної атомізації (у разі визначення мікрокількостей) на спектрофотометрі «Сатурн-3» з комплексом «Графіт-2».

Результати дослідження та їх обговорення. Зміна інтенсивності флуоресценції у 9 видів роду *Symphoricarpos* які зростають на колекційно-експозиційних ділянках у Національному ботанічному саду ім. М. М. Гришка НАН України показано на графіках (рис. 1, 2). Показник F_o (рівень флуоресценції хлорофілу, котра випромінюється комплексами ФС II з «відкритими» реакційними центрами) залежить від втрат енергії збудження при її міграції по пігментній матриці світлозбиральних комплексів [5].

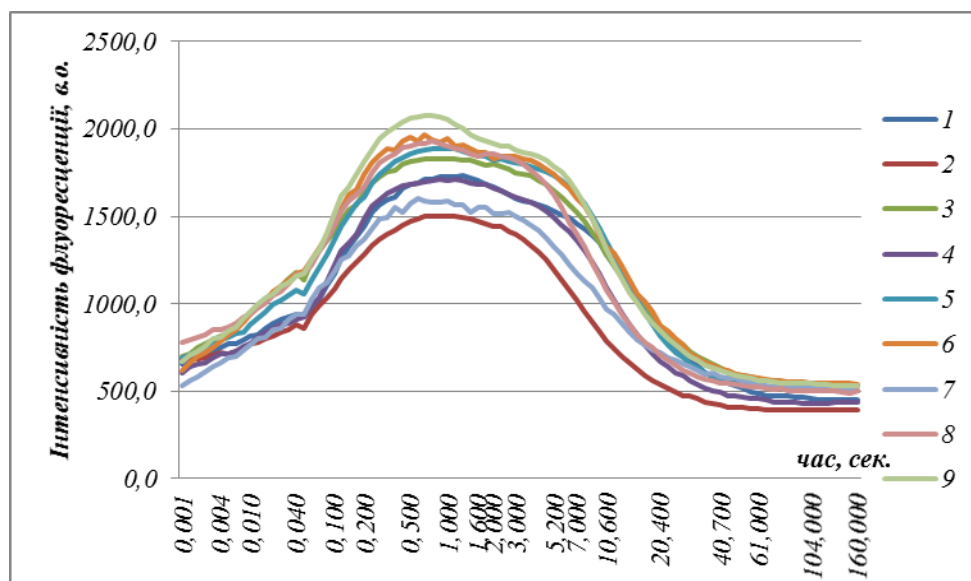


Рис. 1. Індукційні зміни флуоресценції хлорофілу листків сніжноягідників (липень 2017 р., середнє за 3-5 листками): 1 – *S. albus*; 2 –

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

S. hesperius; 3 – *S. ×doorenbosii*; 4 – *S. ×chenaultii*; 5 – *S. mollis*; 6 – *S. orbiculatus*; 7 – *S. oreophilus*; 8 – *S. occidentalis*; 9 – *S. rivularis*

Усі рослини сніжногідників в липні місяці мають незначну інтенсивність F_o , в межах 350–540 відн. од., що в 3–4 рази менше ніж в основному максимумі індукційної кривої (F_{pL}). Останнє вказує на незначну частку хлорофілу який не приймає участі у фотосинтезі. Значення флуоресценції на рівні F_{pL} опосередковане швидким насиченням енергією реакційних центрів ФСII, які не відновлюють первинний акцептор Q_a , що характеризує їх як не активні. Наростання флуоресценції від F_o до F_{pL} , визначається показником ΔF_{pL} і в нашому експерименті він був на рівні 840–1100 відн. од.

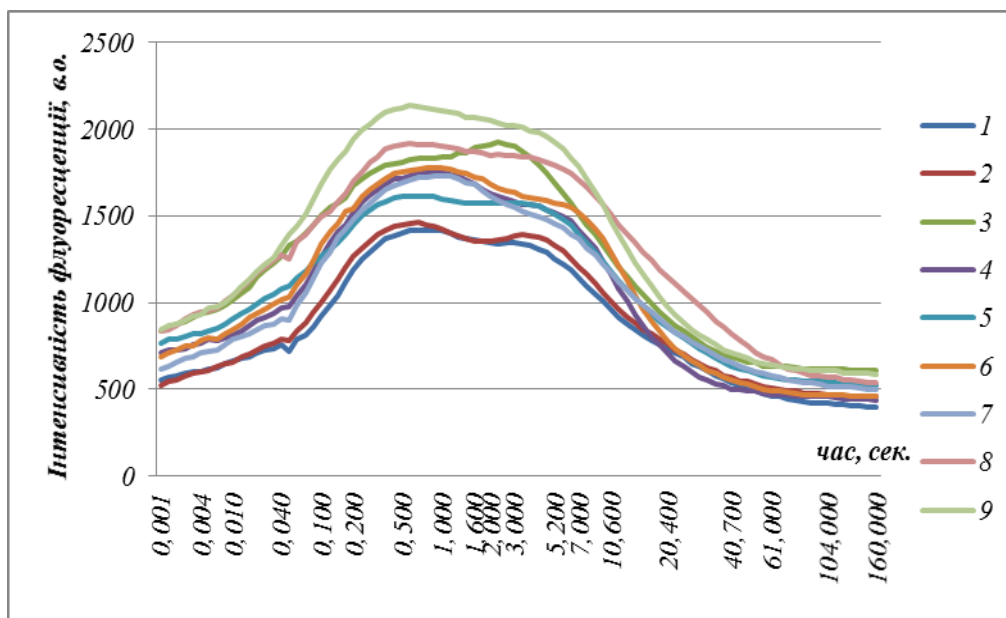


Рис. 2. Індукційні зміни флуоресценції хлорофілу листків сніжногідників (серпень 2017 р., середнє за 3-5 листками): 1 – *S. albus*; 2 – *S. hesperius*; 3 – *S. ×doorenbosii*; 4 – *S. ×chenaultii*; 5 – *S. mollis*; 6 – *S. orbiculatus*; 7 – *S. oreophilus*; 8 – *S. occidentalis*; 9 – *S. rivularis*

Вважається, що за насичуючого фотосинтез рівня освітленості (300–600 Вт/м²), співвідношення $\Delta F_{pL}/F_v$, визначає частку Q_a , які не відновлюють реакційні центри. При цьому воно досить незначне, оскільки F_p а з ним і F_v насичується при значно вищій інтенсивності збуджуючого світла ніж F_{pL} . В нашому експерименті рівень інтенсивності збуджуючого світла був на порядок нижчим, і тому інтенсивність флуоресценції на рівні F_{pL} співставне з F_p . Отже співвідношення $\Delta F_{pL}/F_v$ буде набагато більше ніж за насичуючого світла. Проте

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

за таких умов проведення експерименту цей показник з більшою ефективністю може характеризувати рівень зараження рослин патогенами вірусної природи [12]. За даними вірусологів Кирика М. М., Таранухо Ю. М., перевищення рівня $\Delta F_{pL}/F_v$ 0,45 (за низької інтенсивності збуджуючого світла), вказує на високу імовірність враження рослин вірусною інфекцією. У нашому досліді $\Delta F_{pL}/F_v$ було в межах 0,35–0,45, що може бути ознакою відсутності вірусної інфекції в дослідних зразках. Параметр F_p характеризує найбільший рівень флуоресценції хлорофілу a , що фіксується на індукційній кривій. За умов насичуючої інтенсивності світла максимальне значення флуоресценції обумовлено динамічною рівновагою між процесами флуоресценції, фотохімії і теплової дисипації. Вважається що у точці F_p за максимального рівня флуоресценції фотосинтез знаходиться на мінімальному рівні [13]. Для рослин сніжноягідників у липні місяці він знаходиться у межах 1500–2075 відн. од. Цей параметр найбільш варіабельний, що обумовлено адаптивними змінами у структурі пігментного комплексу відповідно до інтенсивності випромінювання. За недостатньої інсоляції відбувається збільшення як світлозбираючих, так і антенних хлорофілів, що супроводжується зростанням рівня F_p особливо у видів *S. rivularis*, *S. orbiculatus* і *S. occidentalis*. Найменша амплітуда F_p зареєстрована у *S. hesperius* і *S. oreophilus*. Останнє зв'язано з архітектонікою та розмірами рослин. При цьому коефіцієнт індукції K_I змінюється (залежно від виду) від 0,68 до 0,78 що вказує на високу ефективність структурно-функціональної організації супрамолекулярних комплексів реакційних центрів фотосистеми 2 (ФС II) в усіх видів сніжноягідників.

Поява другого максимуму на індукційній кривій (який часто зветься М-піком) пов'язана із збільшенням споживання АТФ в процесі індукції циклу Кальвіна, що призводить до тимчасової релаксації градієнта протонів у тилакоїдній мембрані хлоропластів (ΔpH), а також до зниження нефотохімічного гасіння флуоресценції [10]. Низка авторів вважає, що індукція циклу Кальвіна, як і амплітуда піка М, залежить від концентрації поновленого

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

НАДФ⁺, який визначається доступністю та швидкістю фотосинтетичної фіксації CO₂ [14, 15].

У нашому випадку інтенсивність флуоресценції у другому максимумі змінюється від 1370 до 1865 відн. од. Вважається, що в умовах недостатньої освітленості інтенсивність параметру F_{p2} (*M-nik*) може бути вищою за F_p . В наших дослідженнях був зареєстрований лише один випадок перевищення F_{p2} над параметром F_p , для виду *S. ×doorenbosii* (рис. 2, 3), що вказує на достатнє освітлення рослин які досліджуються.

Зменшення флуоресценції від F_{p2} супроводжується зростанням інтенсивності фотосинтезу, активацією основного ферменту циклу Кальвіна, рибулозобісфосфаткарбоксилази [5, 16, 17]. Інтенсивність зменшення (спаду) флуоресценції до рівня F_t характеризується коефіцієнтом $Rfd = F_p - F_t / F_p$. У нашому випадку цей коефіцієнт у липні змінюється від 1,93 у *S. oreophilus* до 2,68 у *S. occidentalis*, що вказує на високу інтенсивність фотохімічних процесів у цих рослин. У серпні коефіцієнт Rfd також високий і знаходиться в межах 2,01–2,63. Він отримав також назву індексу життєздатності [18, 19].

Відмітимо надзвичайно високу стабільність параметрів ІФХ: у середньому інтенсивність флуоресценції в максимумах F_{p1} і F_{p2} зменшилася на 4,0 та 1,5 %, а коефіцієнти K_1 і K_2 (Rfd) на 3,4 та 6,0 %. Водночас прогнозовано зросла інтенсивність початкового і стаціонарного рівнів флуоресценції F_o і F_t на 7,6 та 2,9 % відповідно. При цьому відомо, що для багатьох видів рослин параметри F_{p1} , F_{p2} , F_o , F_t , а також коефіцієнти K_1 і K_2 (Rfd) за нетривалий час можуть змінюватися на 30–40 % [10, 20, 21]. Відмітимо також, що найбільші зміни амплітудних параметрів флуоресценції до 15–20 % зареєстровано для найпоширенішого в Україні виду *S. albus*, проте при цьому коефіцієнти фотосинтетичної ефективності K_1 і K_2 (Rfd) відрізнялися стабільністю (0 і 6 %). Відомо, що останні визначаються формою кривої Каутського, яка найповніше відображає хід фотосинтетичних процесів при переході від темряви до світла. Тому було проведено порівняння змін у часі (липень-серпень) нормованих за амплітудою кривих, що відображає зміни саме їхньої форми (рис. 3).

Мамонова Р. Ю., Китасв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

Вид *S. albus* відрізняється найбільшою часовою стабільністю показників в усьому часовому діапазоні індукційних переходів флуоресценції хлорофілу. Тому він був обраний еталонним для подальшого аналізу нормованих індукційних кривих з метою виявлення найбільш варіабельних ділянок, що визначають зміни у фотосинтетичному апараті листків в онтогенезі (рис. 4 а, б).

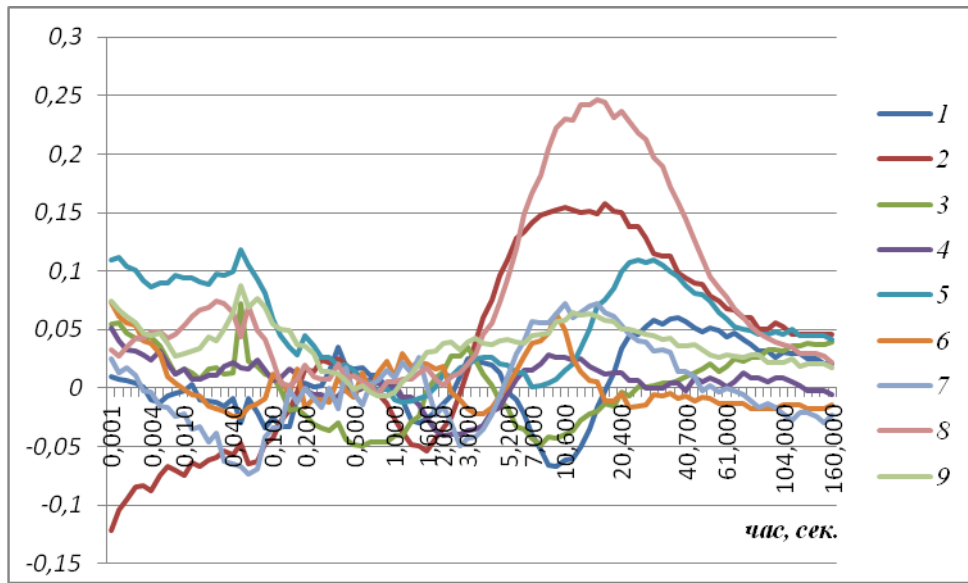
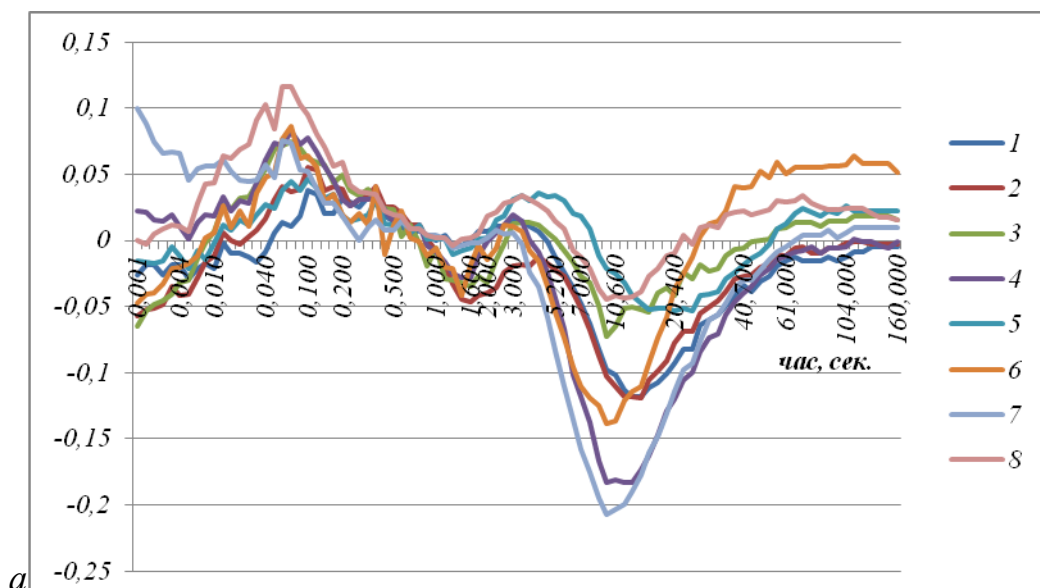


Рис. 3. Порівняльний аналіз за часом нормованих індукційних змін флуоресценції хлорофілу листків сніжногідників (липень-серпень 2017 р.): 1 – *S. albus*; 2 – *S. hesperius*; 3 – *S. ×doorenbosii*; 4 – *S. ×chenaultii*; 5 – *S. mollis*; 6 – *S. orbiculatus*; 7 – *S. oreophilus*; 8 – *S. occidentalis*; 9 – *S. rivularis*



а

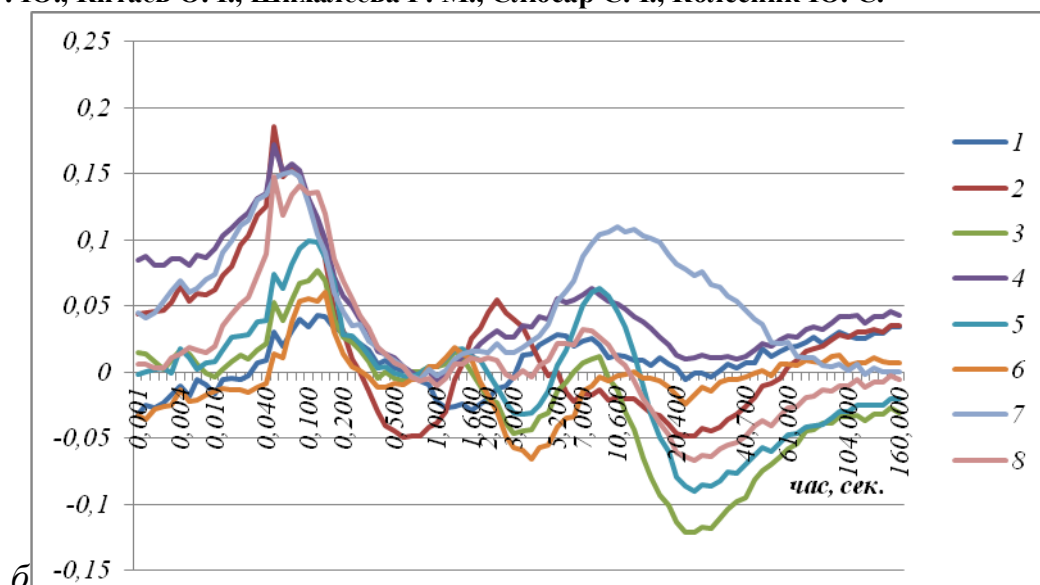


Рис. 4. Порівняльний аналіз з видом *S. albus* нормованих індукційних змін флуоресценції хлорофілу листків сніжноягідників (липень – а, серпень – б): 1 – *S. hesperius*; 2 – *S. ×doorenbosii*; 3 – *S. ×chenaultii*; 4 – *S. mollis*; 5 – *S. orbiculatus*; 6 – *S. oreophilus*; 7 – *S. occidentalis*; 8 – *S. rivularis*

Важливо також зауважити, що для липня місяця достатньо чітко на кривих нормованих індукційних змін виділяються два максимуми – у часовому діапазоні які характерні для процесів що визначають ріст флуоресценції до рівня «плато» (зміни із знаком +) і на спаді флуоресценції (зміни із знаком –). Хвиля позитивної зміни амплітуди флуоресценції у часовому діапазоні «плато» індукції вказує на накопичення пула реакційних центрів ФСII, що не поновлюють *Qb*. Разом з тим синхронне зменшення значень нормованих індукційних змін інтенсивності флуоресценції у часовому діапазоні повільного спаду флуоресценції можливо пояснити активацією фотохімічних процесів інтенсивність яких корелює з високим рівнем індексу *Rfd*. У серпні (рис. 4 б), позитивна хвиля у часовому діапазоні рівня «плато» дещо вища, а зміни форми кривих на спаді флуоресценції є не такими синхронними. Хоч вони і різняться за амплітудою і знаком, але за амплітудою є незначними. Середнє значення індексу *Rfd* при цьому достатньо високе (2,30), що менше липневих показників всього на 6 %. Останнє вказує на високу стабільність фотосинтетичних процесів у листках.

Мамонова Р. Ю., Китасв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

Насадження сніжноягідника часто розташовані поблизу транспортних магістралей. Багаторічними спостереженнями за станом рослин в місцях з інтенсивним транспортним рухом, виявлено достатньо високу їх стійкість до антропогенного забруднення. Останнє спонукало провести паралельне дослідження вмісту металів-забруднювачів в різних частинах рослин *S. albus*, з використанням методу атомно-абсорбційної спектроскопії (одночасно з визначенням функціонального стану їх листкового апарату методом індукції флуоресценції).

В районі Севастопольської площі на відстані 0,5 м, 1 м та 10 м, а також у парковій зоні Інституту садівництва НААН України (контроль) було відібрано листки, однорічні та багаторічні пагони, коріння і зразки ґрунту. Потрібно зауважити, що для ґрунту (за валовим вмістом металів) показники були різними. Так рівень вмісту мезоелементів Fe і Zn був вищий (у зразках міського ґрунту) на 25 %, тоді як мікроелементів Cu і Mn (у зразках із паркової зони) – майже на 20 %. За вмістом інших елементів відмінності були незначними. Найбільші відмінності прогнозовано виявлені у багаторічних гілках (рис. 5, 6).

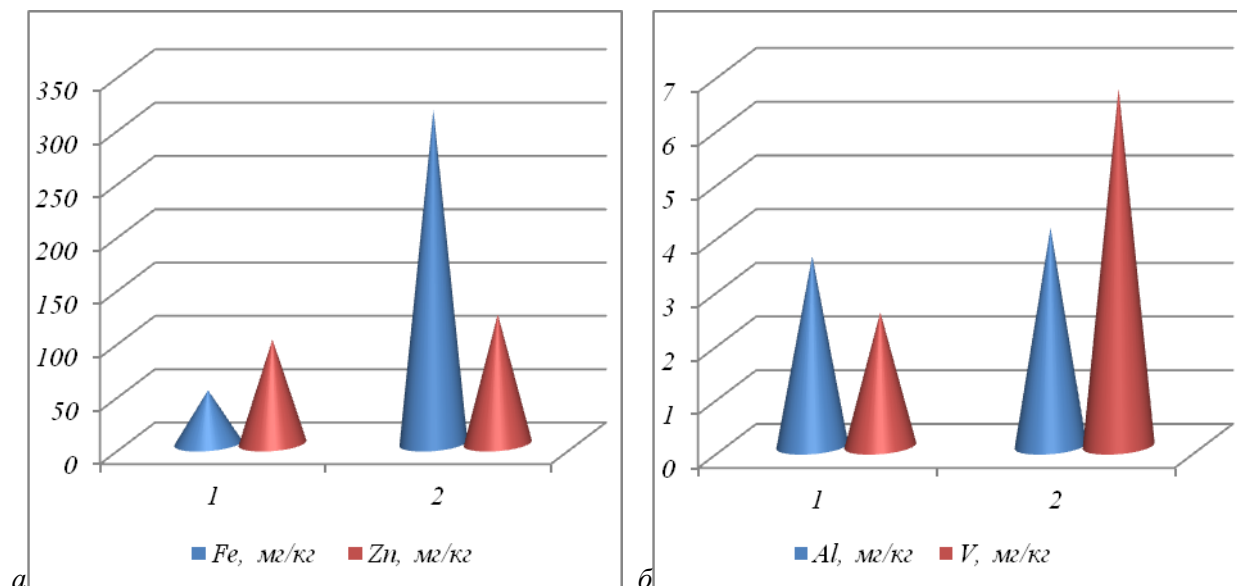


Рис. 5. Вміст мікроелементів Fe, Zn (а), Al и V (б) у багаторічних гілках *S. albus*: 1 – паркова зона; 2 – Севастопольська площа

Мамонова Р. Ю., Китасв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

Так вміст заліза у гілках, які було відібрано в районі Севастопольської площі був в 6,3 рази вищим, міді – в 4,1 рази, ванадію – в 2,7, найтоксичніших металів – свинцю та кадмію, відповідно, – в 2,4 і 1,8 рази.

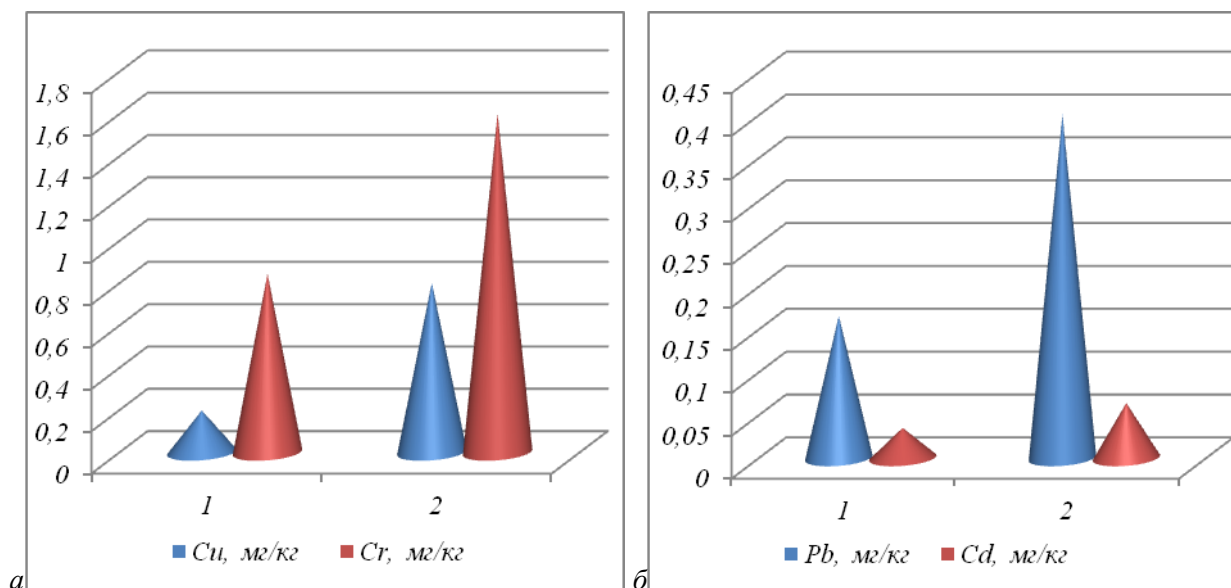


Рис. 6. Вміст мікроелементів Cu, Cr (а), Pb и Cd (б) у багаторічних гілках *S. albus*: 1 – паркова зона; 2 – Севастопольська площа

Порівняльний аналіз параметрів індукції флуоресценції хлорофілу листків *S. albus* із паркової зони та поблизу транспортної магістралі на Севастопольській площі показав високу лабільність швидких фаз індукції флуоресценції (ділянка $F_0 - F_{pL}$). Так, для «коефіцієнту плато» K_{pL} , котрий є відносним показником кількості неактивних реакційних центрів ФСII, визначений негативний вплив (зростання на 50–60 %) умов мегаполісу (рис. 7).

Дещо менше, в межах 30–50 %, зареєстровано зменшення активності фотохімічних процесів (параметр Rfd або K_2). Параметр Rfd характеризує ефективність фотосинтетичних процесів, а саме темної фіксації CO_2 , тобто циклу Кальвіна. Темнові процеси більш чутливі до дії негативних чинників навколишнього середовища. Тому параметри, що їх характеризують, часто використовують для оцінки впливу на рослини різноманітних екологічних стресів [22]. Зміни Rfd достатньо суттєві, що є підтвердженням високої чутливості, інформативності методу, а також доцільності його застосування для

Мамонова Р. Ю., Китасв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

оцінки стійкості рослин сніжноягідників до умов навколишнього середовища (рис. 8).

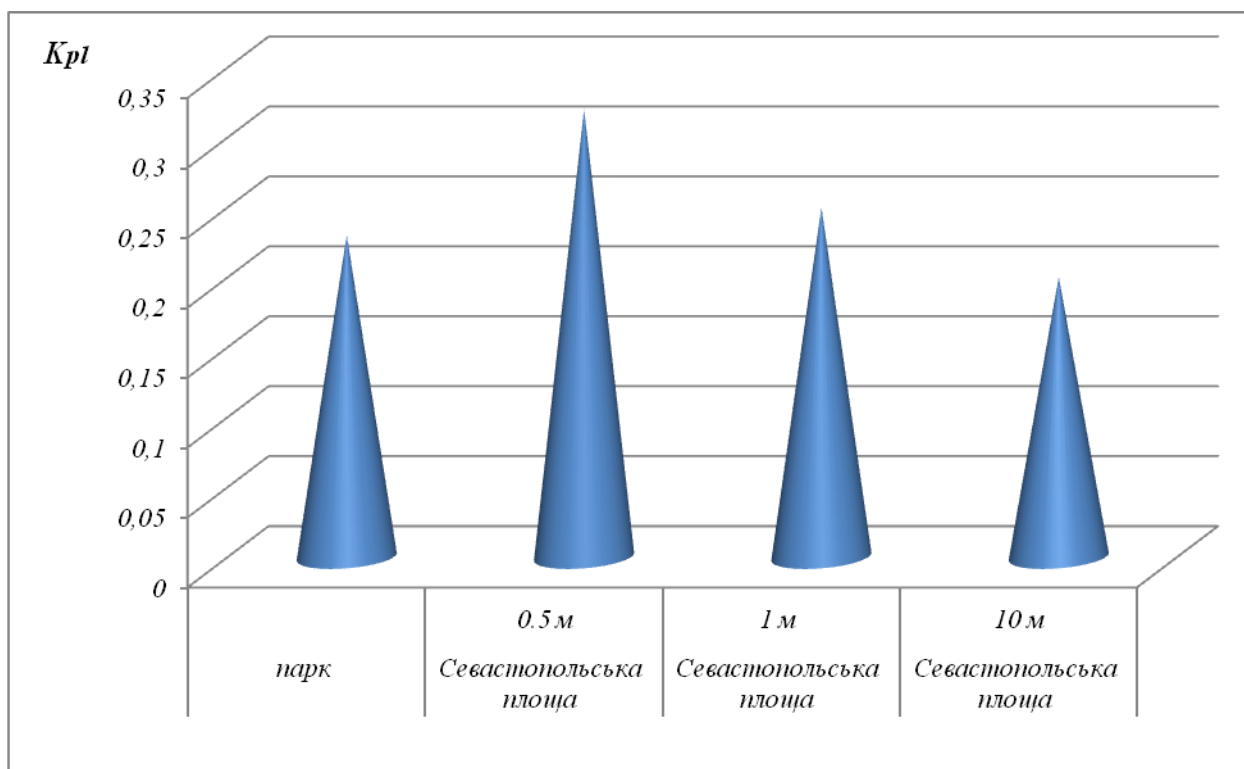


Рис .7. Вплив антропогенного навантаження на відносний вміст неактивних реакційних центрів ФС II (за параметром – K_{pl})

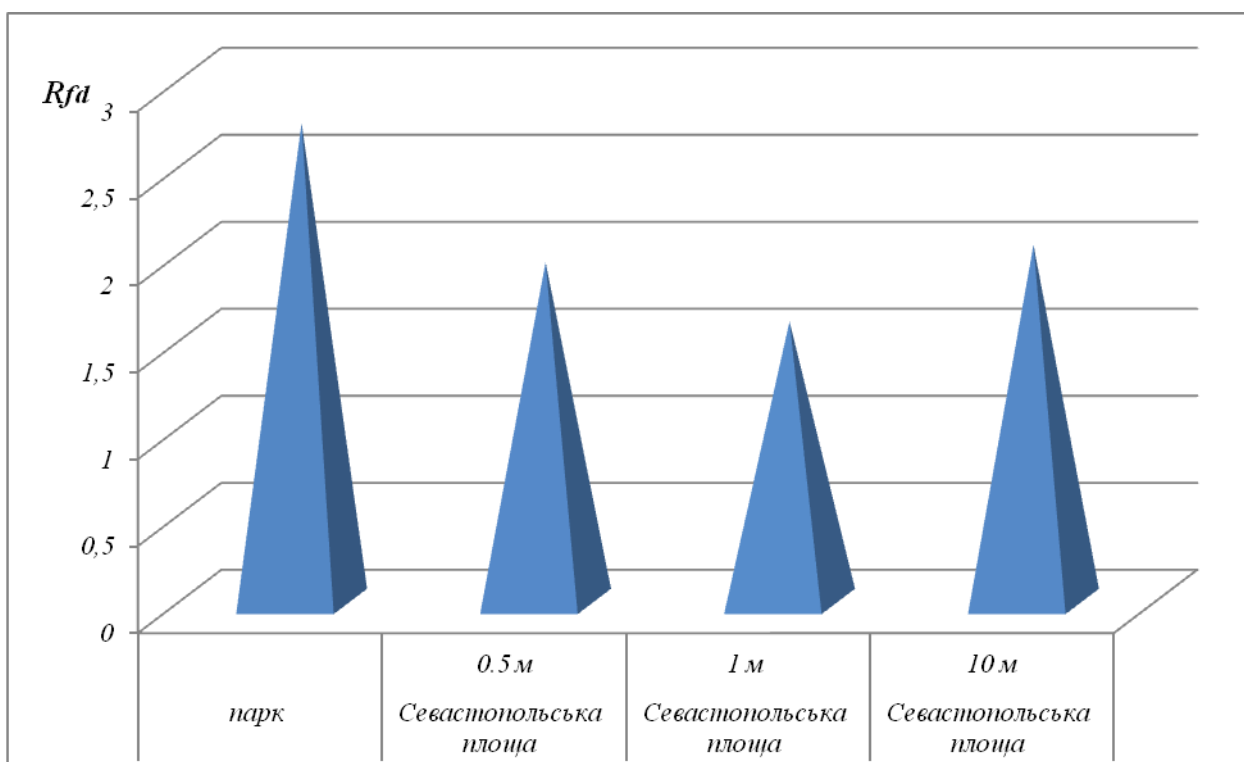


Рис. 8. Вплив антропогенного навантаження на ефективність темнових фотохімічних процесів (за параметром R_{fd})

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

Також виявлено, що параметр K_1 , який характеризує ефективність світлової фази фотосинтезу, для ділянок Севастопольської площі змінюється несуттєво в межах 4,0–6,5 % по відношенню до аналогічних показників, отриманих для рослин паркової зони Інституту садівництва НААН України. Таким чином, підтверджується достатньо висока стабільність світлової фази фотосинтезу, що визначається функціонуванням реакційних центрів фотосистеми 2 (ФСII).

Висновки і перспективи. Дослідженням сезонних змін параметрів індукції флуоресценції хлорофілу листків встановлено надзвичайно малу сезонну мінливість параметрів ІФХ в листках сніжнягідників: у середньому інтенсивність флуоресценції в максимумах F_{p1} і F_{p2} зменшилася на 4,0 та 1,5 %, а коефіцієнт K_1 на 3,4 %, що вказує на високу стабільність електронтранспортних процесів поблизу реакційних центрів ФСII.

Аналіз нормованих індукційних змін інтенсивності флуоресценції у часовому діапазоні повільного спаду флуоресценції вияв незначне зменшення інтенсивності темнових фотохімічних процесів: коефіцієнт K_2 (Rfd) знизився лише на 6,0 %. Таким чином, за комплексним аналізом функціональних показників встановлено високу стабільність фотосинтетичних процесів в листках сніжнягідників, що дозволяє рослинам зберігати декоративність тривалий період.

За порівняльним аналізом накопичення металів-забруднювачів і параметрів індукції флуоресценції хлорофілу листків *S. albus* із паркової зони та поблизу транспортної магістралі на Севастопольській площі встановлено негативний вплив комплексу чинників на активність реакційних центрів і ефективність темнових фотохімічних процесів. Так за «коефіцієнтом плато» K_{pL} , що контролює кількість неактивних реакційних центрів ФСII, визначено їх зростання на 50–60 %. Також в межах 30–50 %, зареєстровано зменшення параметру Rfd , що вказує на зниження активності темнових фотохімічних процесів, тобто циклу Кальвіна.

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

В той же час ефективність світлової фази фотосинтезу в листках *S. albus* для ділянок Севастопольської площі, по відношенню до аналогічних показників отриманих для рослин паркової зони Інституту садівництва НААН України, змінюється не суттєво, в межах 4,0–6,5 %. Останнє вказує на значну стабільність світлової фази фотосинтезу по відношенню до темнових фотохімічних процесів у рослин сніжногідників та достатньо високий їх адаптивний потенціал рослин в умовах міського середовища.

Результати досліджень дозволяють рекомендувати попередньо випробувані в умовах міста Києва види інтродукованих сніжногідників для використання в насадженнях мегаполісів й зокрема у місцях з підвищеним рівнем техногенного забруднення.

Список літератури

1. *Kautsky H.* Neue Versuche zur Kohlensäureassimilation / H. Kautsky, A. Hirsch // *Naturwissenschaften*. – 1931. – Vol. 19, Issue 48. – S. 964.
2. *Карпетян Н. В.* Переменная флуоресценция хлорофилла как показатель физиологического состояния растений / Н. В. Карпетян, Н. Г. Бухов // *Физиология растений*. – 1986. – Т. 33, № 5. – С. 1013–1026.
3. *Schreiber U.* Chlorophyll fluorescence as a diagnostic tool : basics and some aspects of practical relevance / U. Schreiber, W. Bilger, H. Hormann, C. Neubauer. In *Photosynthesis: a comprehensive treatise*. A.S. Raghavendra ed., Cambridge University Press, 1998. – P. 320–336.
4. *Брайон О. В.* Інструментальне вивчення фотосинтетичного апарату за допомогою індукції флуоресценції хлорофілу. Методичні вказівки для студентів біологічного факультету / О. В. Брайон, Д. Ю. Корнеєв, О. О. Снегур, О. І. Китаєв. – К. : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2000. – 15 с.
5. *Корнеєв Д. Ю.* Информационные возможности метода индукции флуоресценции хлорофилла / Д. Ю. Корнеєв. – Киев : Альтерпрес, 2002. – 188 с.
6. *Китаєв О.* Портативний хронофлуорометр для експрес-діагностики фотосинтезу «Флоратест» / О. Китаєв, П. Клочан, В. Романов // Зб. доп. конф. – звіт з комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України у галузі сенсорних систем та технологій (Київ, 2–3 лютого 2005 р.). – Київ, 2005. – С. 59.
7. *Обухов А. И.* Атомно-абсорбционный анализ в почвенно-биологических исследованиях / А. И. Обухов, О. И. Плеханова. – М. : Изд-во МГУ, 1991. – 184 с.
8. *Мамонова Р. Ю.* Зимостійкість інтродукованих сніжногідників (*Symphoricarpos Duhamel*) в умовах Києва / Р. Ю. Мамонова, О. І. Китаєв, С. І. Слюсар // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

природокористування України : Серія: Біологія, біотехнологія, екологія. – 2013. – Вип. 193. – С. 16–25.

9. *Мамонова Р. Ю.* Адаптація та перспективи подальшої інтродукції представників роду Сніжноягідник (*Symphoricarpos Duhamel*) в Лісостепу України / Мамонова Р. Ю., Олексійченко Н. О., Пархоменко Л. І., Слюсар С. І., Колесніченко О. В. // Вісті Біосферного заповідника «Асканія-Нова». – 2012. – Т. 14. – С. 165–169.

10. *Бухов Н. Г.* Старение листа. Выявление участков, лимитирующих фотосинтез, с помощью коэффициентов тушения флуоресценции хлорофилла и редокс-изменений Р-700 в листьях / Н. Г. Бухов // Физиология растений. – 1997. – Т. 44. – С. 352–360.

11. *Нестеренко Т. В.* Применение онтогенетического подхода для флуоресцентных исследований фотосинтетического аппарата растений в стрессовых условиях / Т. В. Нестеренко, А. А. Тихомиров // Биофизика. – 2005. – Т. 50, № 2. – С. 335–340.

12. *Кирик М. М.* Діагностика вірусної інфекції смородини чорної та малини методом індукції флуоресценції хлорофілу листків / М. М. Кирик, Ю. М. Таранухо, М. П. Таранухо, О. І. Китаєв, В. А. Скрыга, Д. М. Артеменко // Вісник аграрної науки : зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 10. – С. 26–28.

13. *Kautsky H.* Das Fluoreszenzverhalten grüner Pflanzen / H. Kautsky, A. Hirsch // Biochem Z. – 1934. – Vol. 274. – P. 422–434.

14. *Walker D. A.* Secondary fluorescence kinetics of spinach leaves in relation to the onset of photosynthetic carbon assimilation / D. A. Walker // Planta. – 1981. – Vol. 153. – P. 273–278.

15. *Bukhov N. G.* The correlation between the induction kinetics of the photoacoustic signal and chlorophyll fluorescence in barley leaves is governed by changes in the redox state of the photosystem II acceptor side. A study under atmospheric and high CO₂ concentrations / N. G. Bukhov, N. Boucher, R. Carpentier // Can. J. Bot. – 1997. – Vol. 75. – P. 1399–1406.

16. *Lichtenthaler H. K.* The Kautsky effect 60 years of chlorophyll fluorescence induction kinetics / H. K. Lichtenthaler // Photosynthetica. – 1992. – Vol. 27, № 1–2. – PP. 45–55.

17. *Lazár D.* Chlorophyll a fluorescence induction / D. Lazár // Biochim. et Biophys. Acta. – 1999. – Vol. 1412, No. 1. – P. 1–28.

18. *Lichtenthaler H. K.* Light adaptation and senescence of the photosynthetic apparatus. Changes in pigment composition, chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic activity // Chlorophyll fluorescence : a signature of photosynthesis / H. K. Lichtenthaler, F. Babani / Eds. Papageorgiou G. C., Govindjee. Dordrecht : Springer, 2004. – P. 713–736.

19. *Lichtenthaler H. K.* How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RF_d of leaves with the PAM fluorometer / H. K. Lichtenthaler, C. Buschmann, M. Knapp // Photosynthetica. – 2005. – Vol. 43, No. 3. – P. 379–393.

20. *Нестеренко Т. В.* Световая зависимость медленной индукции флуоресценции хлорофилла в онтогенезе листьев растений пшеницы /

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

Т. В. Нестеренко, В. Н. Шихов, А. А. Тихомиров // Докл. АН. – 2014. – Т. 454, № 6. – С. 729–732.

21. *Нестеренко Т. В.* Флуоресцентные показатели возрастных изменений фотосинтетического аппарата листьев пшеницы / Т. В. Нестеренко, В. Н. Шихов, А. А. Тихомиров // Физиология растений. – 2015. – Т. 62, № 3. – С. 332–339.

22. *Лысенко В. С.* Флуоресценция хлорофилла растений как показатель экологического стресса: теоретические основы применения метода / В. С. Лысенко, Т. В. Вардуни, В. Г. Соєр, В. П. Краснов // Фундаментальные исследования. Биологические науки. – 2013. – № 4. – С. 112–120.

References

1. Kautsky, H., Hirsch, A. (1931), Neue Versuche zur Kohlensaure assimilation. Naturwissenschaften, 19 (48), 964.

2. Karapetyan, N. V., Buhov, N. G. (1986), Peremennaya fluorestsentsiya hlorofilla kak pokazatel fiziologicheskogo sostoyaniya rasteniy [Variable chlorophyll fluorescence as an indicator of physiological state of plants]. Fiziologiya rasteniy [Plant Physiology]. 33 (5), 1013–1026.

3. Schreiber, U., Bilger, W., Hormann, H., Neubauer C. (1998), Chlorophyll fluorescence as a diagnostic tool: Basics and some aspects of practical relevance. Photosynthesis: a comprehensive treatise. A.S. Raghavendra ed., Cambridge University Press, 320–336.

4. Braion, O. V., Korneev, D. Yu, Snegur, O. O., Kitaev, O. I. (2000). Instrumentalne vyvchennia fotosyntetychnogo aparatu za dopomogoiu induktsii fluorestsentsii khlorofilu. Metodychni vkazivky dlia studentiv biologichnogo fakultetu [Instrumental study of the photosynthetic apparatus using chlorophyll fluorescence induction. Methodical instructions for students of biological faculty]. Kiev: Vydavnycho-poligrafichnyi tsentr Kyivskiy universytet, 15.

5. Korneev, D. Yu. (2002), Informatsionnye vozmozhnosti metoda induktsii fluorestsentsii hlorofilla [Information possibilities of the method of chlorophyll fluorescence induction]. Kyiv: Alterpres, 188.

6. Kytaiev, O., Klochan, P., Romanov, V. (2005), Portatyvnyi hronofluorometr dlia ekspres-diagnosticsyky fotosyntezy «Floratest» [A portable device for the express diagnostics of photosynthesis – fluorometer "Floratest"]. Zb. dop. konf. – zvituu z kompleksnoi programy fundamentalnykh doslidzhen NAN Ukrainy u galuzi sensorynykh system ta tekhnologiy (2–3 liutogo 2005 r., Kyiv) [Proceedings of conference reports on the integrated program of fundamental researches of NAS of Ukraine in the field of sensor systems and technologies (2-3 February 2005, Kyiv)], Kyiv, 59.

7. Obuhov, A. I., Plehanova, O. I. (1991), Atomno-absorbtsionnyy analiz v pochvenno-biologicheskikh issledovaniyakh [Atomic-absorption analysis in soil biology research]. Moscow: Izd-vo MGU, 184 p.

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

8. Mamonova, R. Yu., Kitaiev, O. I. Sliusar, S. I. (2013), Zymostiikist introdukovanykh snizhnoiagidnykiv (Symphoricarpos Duhamel) v umovakh Kyieva [Winter-resistance of introduced snowberries (Symphoricarpos Duhamel) in Kyiv city conditions]. Naukovyi visnyk Natsionalnogo universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy [Scientific Bulletin of National University of Life and environmental Sciences of Ukraine], 193, 16–25.

9. Mamonova, R. Yu., OleksIychenko, N. O., Parkhomenko, L. I., Sliusar, S. I. Kolesnichenko, O. V. (2012), Adaptatsiia ta perspektyvy podalshoi introduktsii predstavnykiv rodynu Snizhnoiagidnyk (Symphoricarpos Duhamel) v Lisostepu Ukrainy [Adaptation and perspective further introduction of the representative of snowberry (Symphoricarpos Duhamel) genus in the Ukrainian Forest-steppe]. Visti Biosfernogo zapovidnyka “Askaniia-Nova” [News Biosphere reserve “Askania Nova”], 14, 165–169.

10. Buhov, N. G. (1997), Starenie lista. Vyyavlenie uchastkov, limitiruyushchikh fotosintez, s pomoshchyu koeffitsientov tusheniya fluorestsentsii hlorofilla i redoks-izmeneniy R-700 v listyah [Leaf senescence. Determination of areas limiting photosynthesis by means of chlorophyll fluorescence quenching coefficients and redox variations of P-700 in the leaves]. Fiziologiya rasteniy [Plant Physiology], 44, 352–360.

11. Nesterenko, T. V., Tihomirov, A. A. (2005), Primenenie ontogeneticheskogo podhoda dlya fluorestsentykh issledovaniy fotosinteticheskogo apparata rasteniy v stressovykh usloviyah [Ontogenetic approach in fluorescence studies of the photosynthetic apparatus of plants under stress]. Biofizika [Biophysics], 50 (2), 335–340.

12. Kirik, M. M., Taranukho, Y. M., Taranukho, M. P., Kytaiev, O. I., Skriaga, V. A., Artemenko, D. M. (2011). Diagnostyka virusnoi infektsii smorodyny chornoj ta malyny metodom induktsii fluorestsentsii hlorofilu lystkiv [Diagnosis of black currant and raspberry viral infection by induction of chlorophyll fluorescence method]. Journal of Agricultural Science, 10, 26–28.

13. Kautsky, H., Hirsch, A. (1934), Das Fluoreszenzverhalten grüner Pflanzen. Biochem Z., 274, 422–434.

14. Walker, D. A. (1981), Secondary fluorescence kinetics of spinach leaves in relation to the onset of photosynthetic carbon assimilation. Planta, 153, 273–278.

15. Bukhov, N. G., Boucher, N., Carpentier, R. (1997), The correlation between the induction kinetics of the photoacoustic signal and chlorophyll fluorescence in barley leaves is governed by changes in the redox state of the photosystem II acceptor side. A study under atmospheric and high CO₂ concentrations. Can. J. Bot., 75, 1399–1406.

16. Lichtenthaler, H. K. (1992), The Kautsky effect 60 years of chlorophyll fluorescence induction kinetics. Photosynthetica, 27, (1–2), 45–55.

17. Lazár, D. (1999), Chlorophyll a fluorescence induction. Biochim. et Biophys. Acta, 1412 (1), 1–28.

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

18. Lichtenthaler, H. K., Babani, F. (2004), Light adaptation and senescence of the photosynthetic apparatus. Changes in pigment composition, chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic activity. Chlorophyll fluorescence : a signature of photosynthesis. Eds. Papageorgiou G. C., Govindjee. Dordrecht : Springer, 2004, 713–736.

19. Lichtenthaler, H. K., Buschmann, C., Knapp, M. (2005), How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio Rfd of leaves with the PAM fluorometer. Photosynthetica, 43 (3), 379–393.

20. Nesterenko, T. V., Shihov, V. N., Tihomirov, A. A. (2014), Svetovaya zavisimost medlennoy induktsii fluorestsentsii hlorofilla v ontogeneze listyev rasteniy pshenitsy [Light dependence of slow chlorophyll fluorescence induction in the course of wheat leaf ontogeny]. Dokl. AN. [Reports of the Academy of Sciences], 454 (6), 729–732.

21. Nesterenko, T. V., Shihov, V. N., Tihomirov, A. A. (2015), Fluorestsentsnyye pokazateli vozrastnykh izmeneniy fotosinteticheskogo apparata listyev pshenitsy [Fluorescent parameters of age-related changes in the photosynthetic apparatus of wheat leaves]. Fiziologiya rasteniy [Plant Physiology], 62 (3), 332–339.

22. Lysenko, V. S., Varduni, T. V., Soyer, V. G., Krasnov, V. P. (2013), Fluorestsentsiya hlorofilla rasteniy kak pokazatel ekologicheskogo stressa: teoreticheskiye osnovy primeneniya metoda [The chlorophyll fluorescence of plants as indicators of environmental stress: the theoretical foundations of the method]. Fundamental research. Biological sciences, 4, 112–120.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА АДАПТИВНОСТИ ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ ВИДОВ РОДА СНЕЖНОЯГОДНИК (SYMPHORICARPOS DUHAMEL) В УСЛОВИЯХ КИЕВА

Р. Ю. Мамонова, О. И. Китаев, Г. Н. Шихалеева, С. И. Слюсарь,
Ю. С. Колесник

Аннотация. Изучены сезонные изменения параметров индукции флуоресценции хлорофилла листьев растений 9 видов рода снежноягодник (*Symphoricarpos Duhamel*): *S. albus* (L.) S.F.Blake, *S. ×chenaultii* Rehder, *S. ×doorenbosii* Krüssm., *S. hesperius* G.N.Jones, *S. mollis* Nutt., *S. occidentalis* Hook., *S. orbiculatus* Moench, *S. oreophilus* A.Gray, *S. rivularis* Suksd. Для оценки функционального состояния зеленых растений использован метод основанный на изучении взаимосвязи изменений интенсивности флуоресценции хлорофилла с фотосинтетическими реакциями в хлоропластах листьев. С целью регистрации флуоресценции и её индукционных изменений в полевых условиях применён портативный прибор – хронофлуорометр «Флоратест» (производства Инженерного центра Института кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины). Анализ содержания металлов-загрязнителей в разных частях растений снежноягодника белого (*S. albus*) проводили с использованием метода атомно-абсорбционной спектроскопии. В листьях

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

большинства видов обнаружено высокую стабильность фотосинтетических процессов, что позволяет растениям сохранять свою декоративность длительный период. Сравнительный анализ накопления металлов-загрязнителей и параметров индукции флуоресценции хлорофилла наиболее распространенного вида *S. albus* позволил определить уровень устойчивости представителей вида к действию негативных факторов городской среды (он является достаточно высоким). При этом выявлено негативное влияние экстремальных условий на активность реакционных центров и эффективность темновых фотохимических процессов в хлоропластах листьев.

Результаты исследований позволяют рекомендовать предварительно испытанные в условиях города Киева виды интродуцированных снежноягодников для использования в насаждениях мегаполисов и в частности в местах с повышенным уровнем техногенного загрязнения.

Ключевые слова: интродуцированные снежноягодники, *Symphoricarpos*, городская среда, металлы-загрязнители, функциональная диагностика адаптивности, индукция флуоресценции хлорофилла, атомно-абсорбционная спектроскопия.

FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF ADAPTABILITY OF INTRODUCED SPECIES OF THE GENUS SNOWBERRY (*SYMPHORICARPOS DUHAMEL*) IN KYIV CITY CONDITIONS

R. Yu. Mamonova, O. I. Kytaiev, H. M. Shykhaliieva, S. I. Slyusar,
Yu. S. Kolesnyk

Abstract. Seasonal inductive changes of chlorophyll fluorescence parameters (Chl FPs) of leaves of 9 species of the genus snowberry (*Symphoricarpos Duhamel*): *S. albus* (L.) S.F.Blake, *S. ×chenaultii* Rehder, *S. ×doorenbosii* Krüssm., *S. hesperius* G.N.Jones, *S. mollis* Nutt., *S. occidentalis* Hook., *S. orbiculatus* Moench, *S. oreophilus* A.Gray, *S. rivularis* Suksd. are studied. For the assessment of the functional state of green plants a method based on the study of correlation of changes in fluorescence intensity of chlorophyll with photosynthetic reactions in chloroplasts of leaves was used. To measure parameters of fluorescence and its inductive changes in the field conditions we used a portable device – a fluorometer "Floratest" (developed by the Engineering Center of V. M. Glushkov Institute of Cybernetics of National Academy of Sciences of Ukraine). The analysis of the content of metal pollutants in the different parts of common snowberry plants (*S. albus*) was carried out using an atomic absorption spectroscopy method. There was found the high stability of photosynthetic processes in the leaves of most species, which allows the plants to maintain their ornamental features for the long periods of time. The comparative analysis of the accumulation of metal pollutants and induction of Chl FPs of the most common species *S. albus* allowed us to determine the level of resistance of species to influence of the negative factors of the urban environment (it is quite high). In this case, the negative influence of the extreme conditions on activity of reaction centers and effectiveness of the dark phase of photosynthesis in chloroplasts in the leaves are established.

Мамонова Р. Ю., Китаєв О. І., Шихалєєва Г. М., Слюсар С. І., Колесник Ю. С.

The results of the research allow us to recommend previously tested in Kyiv city conditions introduced snowberry species for the further usage in the conditions of megacities, and in particular in the places with the high level of contamination.

Keywords: *introduced snowberries, Symphoricarpos, urban environment, metal pollutants, functional diagnostic of adaptation, chlorophyll fluorescence induction, atomic absorption spectroscopy.*