

ФЛУОРЕСЦЕНТНЕ ТЕСТУВАННЯ БУКА ЄВРОПЕЙСЬКОГО В НАЦІОНАЛЬНОМУ ПРИРОДНОМУ ПАРКУ “ПІВНІЧНЕ ПОДІЛЛЯ”

В. І. Мокрий

доктор технічних наук, професор

Національний університет “Львівська політехніка” (м. Львів, Україна)

e-mail: volodymyr.i.mokriy@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-5160>

Е. М. Арустамян

здобувач

Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)

e-mail: plantprotect_dean@nubip.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4845-2909>

В. І. Бондарь

кандидат сільськогосподарських наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)

e-mail: plantprotect_dean@nubip.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-3568>

І. Я. Казимира

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет “Львівська політехніка” (м. Львів, Україна)

e-mail: iryna.y.kazymyra@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1597-5647>

Г. П. Паньковська

кандидат сільськогосподарських наук

Національний природний парк “Північне Поділля” (м. Броди, Україна)

e-mail: park_pp@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6620-7408>

Досліджено флуоресцентні параметри бука європейського в лісових угрупованнях Національного природного парку (НПП) “Північне Поділля”. Обґрунтовано науково-практичне значення аналізу флуоресцентних параметрів для комплексного моніторингу стану лісових екосистем. Актуальність моніторингових досліджень стану дендрофлори зумовлена необхідністю формування базового рівня екологічних даних для оцінки стану й динаміки екосистем парку. Проведено рекогносцирувальні обстеження лісових насаджень, виміряно інтенсивність флуоресценції різновікових дерев, які зростають у різних лісоекологічних умовах. На основі числових характеристик динаміки інтенсивності флуоресценції розраховано індекс життєвості дерев, індикаторні показники впливу екзогенних та ендогенних чинників. Максимальне значення індексу життєвості зафіксовано для старовікових дерев, що зумовлено оптимальними умовами освітленості й місцезростання. У піднаметових дерев підросту внаслідок зменшення освітленості спостерігається зниження значень індексу життєвості, що відображає зниження потенціальної активності фотосинтетичного апарату рослин. Визначено зміни індексу життєвості дерев у різних типах умов місцезростання. Фіксоване зменшення індексу життєвості дерев зумовлене порівняно меншою родючістю ґрунту й забезпеченістю вологою, відображає стресову адаптованість фізіологічних функцій рослин до різних екологічних умов і є основною причиною інактивності фотосинтезу. За результатами флуоресцентного тестування й біоінформативного аналізу визначено фізіологічний стан та адаптивний потенціал бука європейського в межах НПП “Північне Поділля”. Отримані дані щодо змін флуоресцентних параметрів дерев підтверджують чутливість фотосинтетичного апарату до впливу екологічних факторів, а також доцільність вибору бука європейського як тест-об’єкта для оцінки едафічних і гідрогеологічних умов території. Встановлено, що застосування флуоресцентного методу є перспективним під час контролю санітарного стану насаджень, оскільки забезпечує визначення інтегрального наукоємного параметра — індексу життєвості дерев. Обґрунтовано практичне використання сучасних методів флуоресцентного експрес-тестування рослинності, які забезпечують кореляційний синтез фотобіологічних механізмів фотосинтезу й графоаналітичної інформації, що є необхідним під час створення інформаційно-діагностичних систем для комплексного моніторингу екосистем, збереження біорізноманіття та охорони флористичного генофонду природно-заповідних територій.

Ключові слова: моніторинг, біоінформатика, екосистема, індекс життєвості, фізіологічний стан, адаптивний потенціал, фотосинтез.

ВСТУП

Сучасні екологічні виклики, зумовлені кліматичними змінами, техногенним навантаженням і деградацією природних екосистем, потребують нових методів моніторингу стану лісових масивів. Одним із перспективних інструментів є інформаційна технологія флуоресцентного тестування, яка дає змогу швидко й безконтактно оцінювати фізіологічний стан дерев і підліску. Актуальність моніторингових досліджень стану дендрофлори об'єктів природно-заповідного фонду (ПЗФ) зумовлена необхідністю формування базового рівня екологічних даних для оцінки стану й динаміки екосистем.

Бук європейський (*Fagus sylvatica* L.) є ключовою лісотвірною породою в екосистемах Подільського горбогір'я та становить основу біорізноманіття Національного природного парку “Північне Поділля”. Букові ліси виконують важливі екологічні функції: регулюють водний баланс, стабілізують ґрунти, накопичують вуглець і підтримують високу різноманітність флори і фауни. У зв'язку із цим стан букових насаджень безпосередньо визначає рівень екологічної стабільності регіону. Однак сучасні кліматичні зміни, зокрема підвищення середньорічних температур і зниження кількості опадів, посилюють ризики деградації букових екосистем. Бук європейський вразливий до абіотичних стресів, особливо до посух і перегрівання, а також до антропогенних впливів (забруднення повітря та ґрунтів, рекреаційне навантаження). Це зумовлює потребу у впровадженні сучасних методів діагностики фізіологічного стану деревних насаджень. Перспективним методом, що забезпечує виявлення змін у функціонуванні фотосинтетичного апарату рослин під впливом абіотичних та біотичних факторів довкілля, є метод фотоіндукції флуоресценції хлорофілу, відомий як ефект Каутського [1].

Діагностика впливу природних і антропогенних факторів на функціональний стан рослин потребує застосування експресних та інформативних методів. Вимірювання флуоресценції широко використовують у сучасних дослідженнях фотосинтетичних процесів і фізіології стресу в умовах глобальних змін навколишнього середовища [2]. Відомо, що зміни функціональної активності фотосинтетичного апарату позначаються безпосередньо на ефективності фотосинтетичних процесів і, відповідно, на продуктивності рослин [3]. Флуоресценція має тісний зв'язок із процесом фотосинтезу, що дає змогу за змінами параметрів флуоресценції швидко й неінвазивно оцінити стан та активність фотосинтетичного апарату [4]. Реєстрація флуоресценції та аналіз її параметрів забезпечують ефективне тестування стійкості

рослин до умов середовища й автоматизацію вимірювань електронно-конформаційних станів фотосинтетичного апарату.

Незважаючи на широке використання, залишаються проблеми щодо інтерпретації даних за мінливості навколишнього середовища та інтеграції з багатопараметричними моделями оцінки й прогнозування біопродуктивності дендрофлори лісових насаджень територій природно-заповідного фонду.

Важливим аспектом збалансованого природокористування є збереження біологічного й ландшафтного різноманіття. Основним завданням щодо його відтворення є створення та оптимізація природно-заповідних територій і об'єктів відповідно до структури просторових елементів екологічної мережі. Тому особливого значення та актуальності набувають моніторингові дослідження об'єктів і територій ПЗФ як основних структурних елементів екологічної мережі.

Метою роботи є обґрунтування науково-практичного значення аналізу флуоресцентних параметрів бука європейського в насадженнях НПП “Північне Поділля” шляхом застосування біоінформаційних технологій для комплексного моніторингу лісових екосистем парку. Дослідження передбачають рекогносцирувальні обстеження насаджень і лабораторні вимірювання флуоресцентних параметрів рослин для формування соціологічної бази даних.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Протягом останнього десятиліття спостерігається тенденція до підвищення оперативності, точності й надійності визначення функціонального стану рослин шляхом упровадження методичного, математичного, метрологічно-інструментального та апаратно-програмного забезпечення, що є основою інформаційно-вимірювальних систем моніторингу санітарного стану рослинності.

У численних попередніх і сучасних працях [1–4] та інших публікаціях представлено дослідження флуоресцентних параметрів для використання як у фундаментальних, так і в прикладних науках про рослини. Розуміння фізіологічних основ, методів вимірювання й прикладного значення флуоресцентних характеристик різних рослинних систем застосовано для оцінки реакцій рослин на широкий спектр біотичних та абіотичних стресів, а також для діагностики сільськогосподарських культур і екологічного моніторингу. У статті N. R. Baker та ін. продемонстровано, що флуоресцентні індикатори забезпечують високу повторюваність і добре корелюють із біомасою та компонентами

врожайності агротехнічних культур [5]. Дослідження сої показало, що помірна та сильна посуха призвела до значного зниження F_v/F_m — флуоресцентного індикатора впливу екзогенних чинників (до 63,9%), а також до збільшення накопичення NPQ (Non-Photochemical Quenching) й активних форм кисню, що відображає фотоінгібування та оксидантне пошкодження фотосинтетичного апарату [6]. У пшениці й нуту зниження флуоресцентних параметрів, спричинене посухою, корелювало зі зниженням біомаси та врожайності, що робить цей параметр цінним для раннього виявлення стресу й селекції культур [7]. У роботі А. Bhardwaj та ін. фенотипування F_v/F_m разом з індексами теплових пошкоджень використовували для скринінгу термотолерантних генотипів продовольчих культур, що підкреслює його користь у селекційних програмах, спрямованих на стійкість до теплового стресу [8]. Спостережувана кореляція між даними флуоресцентного тестування та індексами фізіологічного стресу підтверджує його використання в агрономічному управлінні в режимі реального часу й системах раннього попередження про стрес [9]. У [10] показано, що F_v/F_m у поєднанні з фізіологічними і спектральними ознаками може ефективно ранжувати генотипові реакції на стрес унаслідок засолення. Це застосування на рівні генотипу поширилося також на рослинні угруповання дикорослих видів і багаторічні культури, пропонуючи масштабований інструмент для скринінгу генетичних ресурсів на стійкість до змін клімату.

Флуоресцентне тестування лісових екосистем має особливе значення, оскільки флуоресцентні параметри все частіше визнаються не лише діагностичними показниками стресу, а й критичними показниками для кількісної оцінки ефективності фотосинтезу в дослідженнях вуглецевого циклу. Як міра максимальної квантової ефективності фотосистеми II (ФС II), параметр F_v/F_m безпосередньо пов'язаний зі здатністю рослинності перетворювати поглинене світло на хімічну енергію [11], що робить його актуальним для оцінок асиміляції вуглецю, таких як валова первинна продукція GPP (Gross Primary Production) і чистий екосистемний обмін NEE (Net Ecosystem Exchange). Ці взаємозв'язки особливо важливі в кліматично чутливих екосистемах, таких як бореальні ліси [12], савани [13] й торфовища Рамсарської конвенції [14], де раннє виявлення стресу може допомогти в адаптивному управлінні лісовими ресурсами.

Створення динамічного флуориметра започаткувало флуоресцентний моніторинг дендрофлори урбоекосистеми м. Львова [15–17]

й лісових екосистем ПЗФ у межах Шацького НПП [18], Природного заповідника “Медобори” [19], НПП “Північне Поділля” [20]. Використовуючи флуоресцентне тестування та аналіз пігментного комплексу за вмістом хлорофілів “а”, “b” і каротиноїдів “с” листяних і хвойних дерев еколого-фітоценотичних поясів, досліджено зниження потенційної активності фотосинтетичного апарату внаслідок впливу урбанізованого міського середовища, а також морфофізіологічний стан головних лісотвірних порід і підліскових чагарників лісостанів території ПЗФ.

Розробка портативного флуорометра “Флоратест” державним науково-інженерним центром мікроелектроніки Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України [21] сприяла активізації флуоресцентних досліджень зелених насаджень міст України. На основі флуоресцентних вимірювань у працях [22–26] охарактеризовано фотосинтетичний апарат багатьох рослин урбанізованого міського середовища. За результатами аналізу змін флуоресцентних параметрів визначено вплив умов місцезростання й генотипової специфічності чубушників [22], культиварів клена гостролистого [23], оцтового дерева та липи серцелистої [24; 25], інтродукованих видів сніжноягідників [26] у м. Києві. Флуоресцентними методами виявлено незначне погіршення функціонального стану дерев, що зростають уздовж транспортних шляхів, порівняно з деревами в насадженнях житлової забудови та парках м. Луцька [27]. У садівництві флуоресцентним методом діагностовано вірусну інфекцію смородини чорної та малини [28].

У зазначених та інших публікаціях виявлено високу чутливість параметрів індукції флуоресценції хлорофілу до уражень досліджених видів хворобами й шкідниками, до впливу несприятливих чинників та умов довкілля, особливостей генотипу рослинності антропогенізованого середовища й агротехнічних культур. Проте рослинність природоохоронних територій флуоресцентними методами досліджена недостатньо. В умовах кліматичних змін флора територій ПЗФ потребує біоінформативних технологій флуоресцентного моніторингу для раннього виявлення стресу, що може забезпечити адаптивне управління ресурсами та збалансоване природокористування.

МАТЕРІАЛИ

ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Науковою основою застосування флуоресцентних методів діагностики стану рослин є біохімічні та біофізичні конверсійні механізми фотосинтезу. При освітленні рослини частина поглинутої енергії використовується у фото-

хімічних перетвореннях, частина розсіюється у вигляді тепла, а решта повторно випромінюється у вигляді флуоресценції. Флуоресценція, що випромінюється переважно хлорофілом "а" у ФС II, дає змогу зрозуміти функціонування та цілісність фотосинтетичного апарату як в оптимальних, так і в стресових умовах. Флуоресценція хлорофілу стала незамінним інструментом у фізіології рослин для оцінки стану й продуктивності фотосинтетичного апарату. Флуоресцентні методи ідентифікують зміни в фотосинтетичному апараті на основі взаємозв'язків між фотосинтетичним перетворенням енергії, регуляцією роботи фотосистем і флуоресценцією хлорофілу. У роботі [7] синтезовано сучасне розуміння фізіологічних основ, методів вимірювання та прикладного значення вимірювання флуоресцентних параметрів різних рослинних систем. Перевагами методу є висока чутливість, експресність і можливість діагностики в польових умовах.

Методологія досліджень передбачала рекогносцирувальні обстеження насаджень і лабораторні вимірювання флуоресцентних параметрів рослин [29]. Відбір зразків листя виконано з нижньої частини крони старовікових дерев і середньої частини крони підросту. Активність фотосинтетичного апарату рослин досліджено методом фотоіндукованої флуоресценції хлорофілу. Перед вимірюванням листки адаптувалися до темноти протягом 3 хв. Кінетику інтенсивності флуоресценції листків вимірюють флуорометром "Флоратест". Дані з приладу передавали на комп'ютер, де інтерпретували програмою "Floratest" у MS Excel для графоаналітичної обробки інформації. Високе часове розділення приладу дає змогу проаналізувати кінетику наростання та спаду інтенсивності флуоресценції досліджуваних об'єктів за числовими характеристиками трьох показників. Фізіологічно значущі дані отримують на основі аналізу числових значень таких показників, як фонові флуоресценція (F_0), максимальна флуоресценція (F_{max}) і стаціонарна флуоресценція (F_{const}). За числовими значеннями інтенсивностей фонові, максимальної та стаціонарної флуоресценції розраховують коефіцієнти кінетики флуоресценції ($K1$, $K2$, $K3$, R_{FD}), які характеризують перебіг світлових фаз фотосинтезу й ефективність фотохімічних процесів засвоєння енергії світла, за формулами:

$$K1 = \frac{F_{max} - F_0}{F_{max}}; \quad (1)$$

$$K2 = \frac{F_{max} - F_{const}}{F_{max}}; \quad (2)$$

$$K3 = \frac{F_{const}}{F_{max}}; \quad (3)$$

$$R_{FD} = \frac{F_{max} - F_{const}}{F_{const}}. \quad (4)$$

На основі аналізу біофізичного змісту нормованих коефіцієнтів кінетики флуоресценції встановлено, що $K1$ — індикаторний показник впливу екзогенних чинників; $K2$ — коефіцієнт індукції флуоресценції, індикаторний показник квантового виходу флуоресценції; $K3$ — індикаторний показник ендогенних чинників; R_{FD} — індекс життєвості, який визначає функціональний стан дерев. Статистичну достовірність зафіксованих відмінностей оцінювали за t -критерієм Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Отримані результати досліджень полягають у визначенні фізіологічного стану та адаптивного потенціалу бука європейського (*Fagus sylvatica* L.) у межах НПП "Північне Поділля" шляхом застосування флуоресцентного тестування й біоінформативного аналізу для якісної оцінки біопродуктивності лісових екосистем і розроблення науково обґрунтованих рекомендацій із моніторингу й збереження букових насаджень. Біоінформаційний аналіз флуоресцентних показників рослинності забезпечує інтерпретацію змін інтенсивності флуоресценції, які відображають стан фотосинтетичного апарату рослин. Отримані дані дають змогу визначити реакцію рослин на стрес, ефективність поглинання світла, активність фотосистеми й динаміку енергетичного обміну.

Показник F_0 — фонове значення індукції флуоресценції після включення опромінення (рис. 1). Біофізичний зміст фонові флуоресценції відображає постійну складову флуоресценції, незалежну від фотохімічних реакцій. Фонові флуоресценція (F_0) випромінюється молекулами хлорофілу, які входять до складу антенного комплексу (ФС II). Технічно F_0 вимірюється в секундному діапазоні до ініціації первинних фотохімічних процесів, пов'язаних із відновленням Q_A — первинного акцептора електронів ФС II. Фоновому рівню відповідає мінімальний квантовий вихід флуоресценції. Показник F_{max} — максимальне значення індукції флуоресценції. Біофізичний зміст максимальної флуоресценції відображає швидке заповнення пулу електронних ємностей на акцепторному боці ФС I, унаслідок чого відновлюються всі первинні акцептори ФС II і відбувається зростання інтенсивності флуоресценції до максимуму. Показник F_{const} — стаціонарне значення

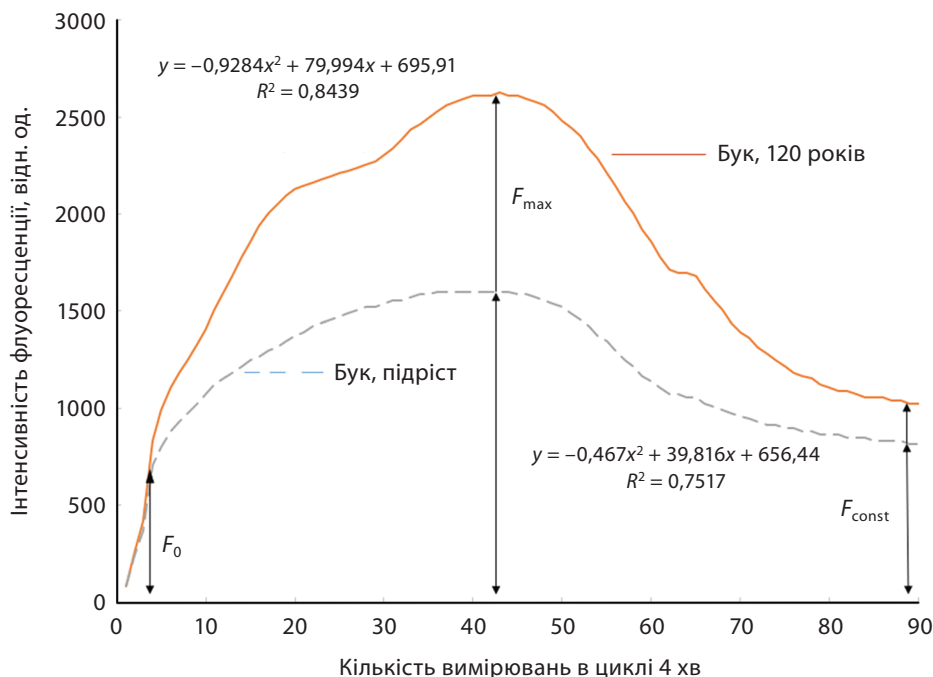


Рис. 1. Кінетика фотоіндукованої флуоресценції листків старовікових дерев і підросту бука європейського в урочищі “Триніг” на території НПП “Північне Поділля”

Джерело: виконано авторами на основі власних досліджень.

Примітка. На вставці: відповідні поліноміальні функції лінії тренду; величина достовірності апроксимації (R^2).

індукції флуоресценції після світлової адаптації листка рослини. Біофізичний зміст стаціонарної флуоресценції відображає налагодження реакцій циклу Кальвіна й потоків речовин через мембрани та по судинах листка.

На підставі порівняльних вимірювань кінетики флуоресценції *in vivo* (рис. 1) визначено коефіцієнти кінетики флуоресценції (табл. 1) для оцінки загального стану різновікових дерев у типових умовах місцезростання. Форма цієї кривої досить чутлива до змін, які відбуваються у фотосинтетичному апараті рослин у різних умовах навколишнього середовища, що слугувало основою для широкого використання флуоресценції в дослідженні фотосинтезу й стресової адаптованості рослин. Виконано порівняльні дослідження флуоресцентних параметрів дерев у лісоекологічних умовах відповідних урочищ у межах НПП “Північне Поділля”, які відповідають двом різним типам умов місцезростання. Лісорослинні умови урочища “Триніг” ідентифікують як S_2 — свіжі, середньої родючості ґрунти. Для урочища “Свята Гора” тип лісорослинних умов ідентифіковано як B_2 — порівняно бідні ґрунтові умови, свіжий субір.

Індикаторний показник впливу екзогенних чинників ($K1$) характеризується незначною варіабельністю (табл. 1). Його значення в межах 90–91% може свідчити про те, що рівень освітленості

досліджуваних зразків однаковий. Старовікові дерева (100–120 років) і підріст мають незначну інтенсивність F_0 , у межах 832–704 відн. од., що у 2–3 рази менше, ніж в основному максимумі індукційної кривої (F_{max}). Останнє вказує на незначну частку хлорофілу, який не бере участі у фотосинтезі. Встановлено, що параметр $K1$, який характеризує вплив екзогенних чинників, у цьому випадку — затіненість нижньої частини крони старовікових дерев і крони підросту, змінюється несуттєво, у межах 90–91% (табл. 1). Останнє вказує на значну стабільність світлової фази фотосинтезу щодо темнових фотохімічних процесів у нижній частині крони дерев лісостану й достатньо високий адаптивний потенціал підросту бука в умовах затіненості. Незначна варіабельність $K1$ у межах 1% відображає вплив архітекtonіки крон на створення ідентичних умов освітленості різновікових дерев у різних умовах місцезростання.

Зміни коефіцієнта індукції флуоресценції ($K2$) достатньо суттєві — у межах 5–18%. Цей індикаторний показник квантового виходу флуоресценції вказує на частку хлорофілів, що беруть участь у фотосинтезі, від загальної їхньої кількості, тобто характеризує ефективність світлової фази фотосинтезу. У досліджених варіантах $K2$ варіює в межах 55–67%, що свідчить про високу частку активних хлорофілів у цих умовах зростання різновікових дерев. У цьому

Таблиця 1.

**Нормовані параметри кінетики фотоіндукованої флуоресценції
хлорофілу листків старовікових дерев і підросту бука європейського
в заповідних урочищах НПП “Північне Поділля”**

Коефіцієнти кінетики флуоресценції	Урочище “Свята Гора”		Урочище “Триніг”	
	Буковий деревостан, ≈ 100 років	Бук, підріст	Буковий деревостан, ≈ 120 років	Бук, підріст
K_1	91	90	90	90
K_2	60	51	67	55
K_3	25	14	32	26
R_{FD}	1,56	0,96	2,03	1,06
Тип лісорослинних умов	B_2		C_2	

Джерело: сформовано авторами на основі власних досліджень.

контексті K_2 виступає чутливим індикатором фотоінгібування ФС II. З цього показника можна отримати значення ступеня фотоінгібування, оскільки значна частина енергії вивільняється у вигляді флуоресценції хлорофілу “a” в умовах, коли багато збуджених електронів від ФС II не переносяться на акцептор, а замість цього переходять назад в основний енергетичний стан. Порівняльний аналіз значень K_2 (табл. 1) вказує на вплив умов місцезростання на ефективність функціонування ФС II. Локалізоване зменшення значень K_2 на 5% в умовах C_2 та більш значуще — 9% в умовах B_2 ідентифікує дефіцит поживних речовин ґрунту для дерев підросту порівняно зі старовіковими деревами. Відносна бідність ґрунтових умов зумовлює зниження ефективності ФС II, що фіксується зменшенням значень K_2 на 4% у дерев підросту й на 7% у старовікових дерев, які зростають в умовах B_2 .

Інформативність параметра K_3 визначається пропорційністю розміру пулу акцепторів електронів Q_A на відновній стороні ФС II і може бути використана як маркер змін кінетики флуоресценції від F_{max} до F_{const} . Повільна індукція флуоресценції фотосинтезуючих об'єктів полягає в зменшенні інтенсивності флуоресценції від максимального рівня до стаціонарного значення. Ендогенні чинники спаду інтенсивності пов'язані з початком активації циклу Кальвіна, при цьому збільшується циклічний потік електронів у фотосистему I (ФС I). На цій стадії відбувається сповільнення електронного транспорту між ФС у зв'язку зі встановленням протонного градієнта. На цій стадії продовжується структурна перебудова мембран і перехід частини світлозбираючого комплексу ФС II з області гран в область стром. Активація циклу Кальвіна знімає блокування нециклічного електронного потоку. Спостережувана загальна тен-

денція зниження K_3 для дерев, що зростають в умовах B_2 , порівняно з деревами, що зростають в умовах C_2 , ідентифікує відносно погіршення ґрунтових умов. Значна варіабельність K_3 у межах 14–32% характеризує швидкість флуоресценції, що є ознакою інтенсивного перебігу темнових фотохімічних реакцій та ідентифікує високу життєвість дерев у реальних умовах місцезростання.

Ступінь зниження рівня флуоресценції хлорофілу від максимального (F_{max}) до стаціонарного (F_{const}) часто використовують як інтегральний показник активності фотосинтетичного апарату рослин. Для цього розраховують коефіцієнт R_{FD} (Fluorescence Decline Ratio), який означає відносне число електронів, яке було передано по електрон-транспортному ланцюгу. Величина R_{FD} отримала також назву індексу життєвості [30; 31]. Згідно з [30], коефіцієнт R_{FD} більш чутливий до зовнішніх впливів, ніж параметри K_1 , K_2 , K_3 , оскільки встановлена кореляція показника R_{FD} з інтенсивністю фіксації вуглекислого газу. Величина R_{FD} показує ефективність темнових фотохімічних процесів і стан фотосинтетичного апарату рослин. Значення індексу спаду флуоресценції залежить від виду рослин та умов зростання. Величина показників $R_{FD} \geq 1,50-2,50$ і більше вказує на високу квантову ефективність фотосинтезу, ідентифікує здорову рослину, що ефективно фотосинтезує. Зменшення значень R_{FD} свідчить про зниження активності хлорофілу й погіршення стану рослини, зумовленого певним стресовим впливом.

Коефіцієнт R_{FD} у досліджених варіантах старовікових дерев, навіть у різних лісорослинних умовах, перебуває у вищезазначеному інтервалі. Розраховані максимальні значення R_{FD} свідчать про оптимальні умови місцезростання. Зниження індексу життєвості старовікових

дерев на $\Delta R_{FD}=0,47$ та підросту на $\Delta R_{FD}=0,1$ ідентифікує відносно погіршення лісорослинних умов. Зі зменшенням освітленості для піднаметових дерев фіксується зменшення значень R_{FD} , що свідчить про зниження потенціальної активності фотосинтетичного апарату дерев підросту. Значна варіабельність $\Delta R_{FD}=0,97$ між старовіковими деревами і підростом в умовах C_2 та $\Delta R_{FD}=0,6$ у лісорослинних умовах B_2 вказує на високу чутливість цього коефіцієнта до зовнішніх впливів.

Отже, визначені зміни $K1$, $K2$, $K3$, R_{FD} відображають стресову адаптованість фізіологічних функцій дерев до різних екологічних умов і є основною причиною інактивації фотосинтезу. Фіксоване зменшення нормованих коефіцієнтів кінетики флуоресценції зумовлене порівняно меншою родючістю ґрунту та освітленістю крон дерев.

Розроблене комплексне забезпечення флуориметричного експрес-методу і технічні пристрої використано для діагностики стану фотосинтетичного апарату рослин у природному середовищі. У режимі реального часу флуориметричні методи дають інформацію про стан фотосинтетичного апарату, ефективність фотосинтезу, а також добову й сезонну динаміку цих характеристик, які є біофізичними сенсорами стану природного середовища. Вони дають змогу детектувати пригнічення рослин під дією природних впливів, задовго до того, як воно проявиться в зовнішніх ознаках рослини — ксерофілізації або всиханні, з подальшою зміною просторово-структурних геоботанічних параметрів фітоценозів. У цьому полягає одна з

головних переваг застосування флуоресцентних експрес-методів екологічного моніторингу.

ВИСНОВКИ

Флуоресцентне тестування є високоефективним методом кліматично адаптованого природокористування, що об'єднує цифрове лісове господарство, екологічне прогнозування та фізіологію стресу в умовах глобальних змін навколишнього середовища. Аналіз нормованих індукційних змін інтенсивності флуоресценції досліджуваних дерев підтверджує чутливість цих параметрів до впливу екологічних факторів, а також доцільність вибору бука європейського як тест-об'єкта для оцінки едафічних і гідрогеологічних умов території НПП “Північне Поділля”.

Подальші дослідження передбачають визначення флуоресцентних індикаторів флористичного різноманіття, формування соціологічної бази даних та інтеграцію з інваріантними моделями оцінки й прогнозування біопродуктивності дендрофлори природоохоронних територій. Математичні моделі кінетики флуоресценції забезпечують не лише механістичне розуміння стресових реакцій рослин, а й масштабований інструмент для інтерпретації та прогнозування динаміки вуглецю в екосистемах. Інтеграція фотобіологічних і фізіологічних вимірювань із моніторингом киснево-вуглецевого балансу забезпечує інформаційно-аналітичну основу для кліматично стійкого управління лісовими ресурсами, прогнозного моделювання стійкості екосистем, оцінки екосистемних послуг і збалансованого природокористування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lichtenthaler, H. K. (1992). The Kautsky effect: 60 years of chlorophyll fluorescence induction kinetics. *Photosynthetic*, 27, 45–55.
2. Cavender-Bares, J., & Bazzaz, F. A. (2004). From leaves to ecosystems: Using chlorophyll fluorescence to assess photosynthesis and plant function in ecological studies. In G. C. Papageorgiou & Govindjee (Eds.), *Chlorophyll a fluorescence* (Vol. 19). Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-1-4020-3218-9_29
3. Zait, Y., Shemer, O. E., & Cochavi, A. (2024). Dynamic responses of chlorophyll fluorescence parameters to drought across diverse plant families. *Physiologia Plantarum*, 176(5), e14527. doi: 10.1111/ppl.14527
4. Faseela, P., Sinisha, A. K., Brestič, M., & Puthur, J. T. (2020). Chlorophyll a fluorescence parameters as indicators of a particular abiotic stress in rice. *Photosynthetic*, 58(SI), 293–300. doi: 10.32615/ps.2019.147
5. Baker, N. R., & Rosenqvist, E. (2004). Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities. *Journal of Experimental Botany*, 55(403), 1607–1621. doi: 10.1093/jxb/erh196
6. Wang, L., He, P., Hui, M., Li, H., Sun, A., Yin, H., & Gao, X. (2024). Metabolomics combined with transcriptomics and physiology reveals the regulatory responses of soybean plants to drought stress. *Frontiers in Genetics*, 15, 1458656. doi: 10.3389/fgene.2024.1458656
7. Jiao, Q., & Hu, X. (2025). Recent advances and emerging trends in chlorophyll fluorescence parameter Fv/Fm. *Phyton: International Journal of Experimental Botany*, 94(9), 2615–2630. doi: 10.32604/phyton.2025.069246
8. Bhardwaj, A., Kaur, S., Padhiar, D., & Nayyar, H. (2024). Phenotyping for heat tolerance in food crops. *Plant Physiology Reports*, 29(4), 736–748. doi: 10.1007/s40502-024-00833-0
9. Al-Tamimi, N., Langan, P., Bernád, V., Walsh, J., Mangina, E., & Negrão, S. (2022). Capturing crop adaptation to abiotic stress using image-based technologies. *Open Biology*, 12(6), 210353. doi: 10.1098/rsob.210353
10. Elfanah, A. M. S., Darwish, M. A., Selim, A. I., Elmoselhy, O. M. A., Ali, A. M., El-Maghraby, M. A., & Abdelhamid, M. T. (2023). Hyperspectral reflectance and agro-physiological traits for field identification of salt-tolerant wheat genotypes using the genotype by yield trait biplot technique. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1165113. doi: 10.3389/fpls.2023.1165113

11. Sun, D., & Wang, Q. (2018). Linear relationships between photosynthetic rate and photochemical energy expressed by PAR × Fv/Fm. *American Journal of Plant Sciences*, 9(2), 125–138. doi: 10.4236/ajps.2018.92011
12. Nichol, C. J., Drolet, G., Porcar-Castell, A., Wade, T., Sabater, N., Middleton, E. M., MacLellan, C., Levula, J., Mammarella, I., Vesala, T., & Atherton, J. (2019). Diurnal and seasonal solar induced chlorophyll fluorescence and photosynthesis in a boreal Scots pine canopy. *Remote Sensing*, 11(3), 273. doi: 10.3390/rs11030273
13. Perez-Priego, O., Guan, J., Rossini, M., Fava, F., Wutzler, T., Moreno, G., ... Migliavacca, M. (2015). Sun-induced chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index improve remote-sensing gross primary production estimates under varying nutrient availability in a typical Mediterranean savanna ecosystem. *Biogeosciences*, 12(21), 6351–6367. doi: 10.5194/bg-12-6351-2015
14. Bartold, M., & Kluczek, M. (2024). Estimating of chlorophyll fluorescence parameter Fv/Fm for plant stress detection at peatlands under Ramsar Convention with Sentinel-2 satellite imagery. *Ecological Informatics*, 81, 102603. doi: 10.1016/j.ecoinf.2024.102603
15. Кучерявий, В. П., Мокрий, В. І., Гнатів, П. С., Пахолюк, М. П., & Артемовська, Д. В. (1992). Оптикоелектронний метод тестування фотосинтетичного апарату в урбогенних умовах. У *Тезах доповідей 44-ої науково-технічної конференції ЛЛТІ* (с. 42–43). Львів: ЛЛТІ.
16. Мокрий, В. І., Гридзук, С. Д., & Панківський, Ю. І. (1999). Флуоресцентний метод тестування стійкості рослин урбанізованого середовища. *Науковий вісник*, 9, 8, 107–109.
17. Мокрий, В. І., Мудрак, О. В., Петрушка, І. М., Гречаник, Р. М., Арустамян, Е. М., & Мудрак, Г. В. (2023). Флуоресцентне тестування бука європейського у ботанічних пам'ятках природи Львова. *Український журнал природничих наук*, 3, 7–23. doi: 10.32782/naturaljournal.3.2023.7-23
18. Мокруу, V., Trofimchuk, O., Pohrebennyk, V., Politylo, R., Radchuk, R., Radchuk, I., Zagorodnya, S., & Kurlyak, I. (2016). Biophysical monitoring of forest ecosystems. *Acta Facultatis Studiorum Humanitatis et Naturae Universitatis Presoviensis: Natural Sciences*, 43, 166–171.
19. Бондаренко, Т. В., Мокрий, В. І., & Паславський, М. М. (2012). Флуоресцентне тестування підліскових чагарників природного заповідника “Медобори”. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Лісівництво та декоративне садівництво*, 171(1), 38–43. Взято з http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnaul_lis_2012_171%281%29_8
20. Петрушка, І. М., Мокрий, В. І., Арустамян, Е. М., Паньковська, Г. П., & Сомаг, Г. В. (2025). Кореляційно-регресійний аналіз флуоресценції букових лісів Національного природного парку “Північне Поділля”. *Грааль науки*, 58, 297–304. doi: 10.36074/grail-of-science.14.11.2025.034
21. Китаєв, О., Клочан, П., & Романов, В. (2005). Портативний хронофлуорометр для експрес-діагностики фотосинтезу “Флоратест”. У *Збірнику доповідей конференції-звіту з комплексної програми фундаментальних досліджень НАН України у галузі сенсорних систем та технологій* (с. 59). Київ.
22. Костенко, С. М., Китаєв, О. І., & Ковалевський, С. Б. (2014). Індукція флуоресценції хлорофілу листків представників роду *Philadelphus* L. в умовах міста Києва. *Науковий вісник НЛТУ України*, 24(4), 209–213.
23. Манько, М. В., Олексійченко, Н. О., & Китаєв, О. І. (2016). Особливості індукції флуоресценції хлорофілу в листках рослин культиварів *Acer platanoides* L. в умовах міста Києва. *Науковий вісник НЛТУ України*, 26(5), 102–109.
24. Олексійченко, Н. О., Китаєв, О. І., Совакова, М. О., Соваков, О. В., & Боршевський, М. О. (2013). Особливості індукції флуоресценції хлорофілу в листках деревних рослин в умовах урбанізованого середовища. *Біоресурси і природокористування*, 5(5–6), 107–112. Взято з http://nbuv.gov.ua/UJRN/bpc_2013_5_5-6_14
25. Олексійченко, Н. О. (2009). Індукція флуоресценції хлорофілу листя липи серцелистої у вуличних насадженнях Києва. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 7, 95–97.
26. Мамонова, Р. Ю., Китаєв, О. І., Шихалеева, Г. М., Слюсар, С. І., & Колесник, Ю. С. (2018). Функціональна діагностика адаптивності інтродукованих видів роду сніжноягідник (*Symphoricarpos Duhamel*) в умовах Києва. *Наукові доповіді НУБіП України*, 1(71), 113–134.
27. Шепелюк, М. О., Ковалевський, С. Б., & Китаєв, О. І. (2017). Флуоресценція хлорофілу та її індукційні зміни в листках деревних рослин в умовах урбанізованого середовища міста Луцька. *Науковий вісник НЛТУ України*, 27(1), 101–105. doi: 10.15421/40270122
28. Кирик, М. М., Таранухо, Ю. М., Таранухо, М. П., Китаєв, О. І., Скрыга, В. А., & Артеменко, Д. М. (2011). Діагностика вірусної інфекції смородини чорної та малини методом індукції флуоресценції хлорофілу листків. *Вісник аграрної науки*, 10, 26–28.
29. Капустяник, В. Б., & Мокрий, В. І. (2009). *Прикладна спектроскопія*. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка.
30. Lichtenthaler, H., 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. doi: 10.1007/s11099-005-0062-6
31. Rao, L., Li, S., & Cui, X. (2021). Leaf morphology and chlorophyll fluorescence characteristics of mulberry seedlings under waterlogging stress. *Scientific Reports*, 11, 13379. doi: 10.1038/s41598-021-92782-z

FLUORESCENCE TESTING OF EUROPEAN BEECH IN THE NORTHERN PODILLIA NATIONAL NATURE PARK

Mokryi V.

Doctor of Technical Sciences, Professor

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

e-mail: volodymyr.i.mokryi@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-5160>

Arustamian E.

Postgraduate Student

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
e-mail: plantprotect_dean@nubip.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4845-2909>

Bondar V.

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)
e-mail: plantprotect_dean@nubip.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-3568>

Kazymyra I.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Lviv Polytechnic National University (Lviv, Ukraine)

e-mail: iryna.y.kazymyra@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1597-5647>

Pankovska H.

Candidate of Agricultural Sciences

Northern Podillia National Nature Park (Brody, Ukraine)

e-mail: park_pp@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6620-7408>

*The fluorescent parameters of European beech (*Fagus sylvatica* L.) were investigated in forest communities of the Northern Podillia National Nature Park. The scientific and practical significance of analyzing fluorescent parameters for integrated monitoring of forest ecosystem condition is substantiated. The relevance of monitoring studies of dendroflora lies in establishing a baseline of environmental data to assess the state and dynamics of the park's ecosystems. Reconnaissance surveys of forest stands were conducted, and fluorescence intensity was measured in trees of different age classes growing under diverse forest ecological conditions. Based on the numerical characteristics of fluorescence intensity dynamics, a tree vitality index and indicator parameters reflecting the influence of exogenous and endogenous factors were calculated. The highest vitality index values were recorded for old-growth trees, attributed to optimal light conditions and site characteristics. In contrast, understory saplings exhibited reduced vitality index values due to decreased light availability, reflecting a decline in the potential activity of the photosynthetic apparatus. Variations in the tree vitality index were observed across different site conditions. The observed decrease in vitality index values is associated with relatively lower soil fertility and water availability, reflecting stress-induced adaptive responses of plant physiological functions to varying environmental conditions and representing a primary cause of photosynthetic inactivation. Based on fluorescence testing and bioinformatic analysis, the physiological state and adaptive potential of European beech within the Northern Podillia National Nature Park were determined. The obtained data on changes in tree fluorescence parameters confirm the photosynthetic apparatus's sensitivity to environmental factors and substantiate the suitability of European beech as a test object for assessing edaphic and hydrogeological conditions on the territory. It was established that the fluorescence method is promising for monitoring the sanitary condition of forest stands, as it enables the determination of an integral, scientifically informative parameter — the tree vitality index. The practical applicability of modern fluorescence-based express testing methods for vegetation is justified, as these methods provide a correlational synthesis of photobiological mechanisms of photosynthesis and graph-analytical information, which is essential for the development of information and diagnostic systems for integrated ecosystem monitoring, biodiversity conservation, and protection of the floristic gene pool of protected natural areas.*

Keywords: monitoring, bioinformatics, ecosystem, vitality index, physiological state, adaptive potential, photosynthesis.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

МОКРИЙ Володимир Іванович — доктор технічних наук, професор, Національний університет “Львівська політехніка” (вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013; e-mail: volodymyr.i.mokriy@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-5160>).

АРУСТАМЯН Едуард Максимович — здобувач, Національний університет біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв Оборони, 13, м. Київ, Україна, 03041; e-mail: plantprotect_dean@nubip.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4845-2909>).

БОНДАРЬ Валерія Іванівна — кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Національний університет біоресурсів і природокористування України (вул. Героїв Оборони, 13, м. Київ, Україна, 03041; e-mail: plantprotect_dean@nubip.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-3568>).

КАЗИМИРА Ірина Ярославівна — кандидат технічних наук, доцент, Національний університет “Львівська політехніка” (вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013; e-mail: iryna.y.kazymyra@lpnu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1597-5647>).

ПАНЬКОВСЬКА Галина Петрівна — кандидат сільськогосподарських наук, Національний природний парк “Північне Поділля” (вул. Бродівська, 21А, с. Ясенів, Золочівський р-н, Львівська обл., Україна, 80661; e-mail: park_pp@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6620-7408>).