

<https://doi.org/10.15407/frg2022.02.161>

УДК 581.132+631.89+632.122

АКТИВНІСТЬ ФОТОСИНТЕТИЧНОГО АПАРАТУ *MISCANTHUS* × × *GIGANTEUS* ЗА УМОВ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ ДИЗЕЛЬНИМ ПАЛЬНИМ І ВНЕСЕННЯ БІОЧАРУ

А.І. ГЕРЦ¹, О.Б. КОНОНЧУК¹, Н.В. ГЕРЦ¹, В.В. ПІДЛІСНЮК², В.О. ХОМЕНЧУК¹,
С.В. ПИДА¹

¹Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
46027 Тернопіль, вул. М. Кривоноса, 2

²Університет Яна Євангеліста Пуркіне в Усті-над-Лабем
400 96 Чеська Республіка, Устя-над-Лабем, вул. Пастерова, 3632/15
e-mail: herts@chem-bio.com.ua

В умовах вегетаційного дослідження вивчали особливості фотосинтетичного апарату (ФСА) листків міскантусу гігантського (*Miscanthus* × *giganteus*) за впливу забруднення ґрунту дизельним пальним (0,25—5 г/кг) та внесення добрива біочар (5 %). Метою роботи було дослідження показників фотосинтетичної діяльності як маркерів адаптаційної здатності рослини *M. × giganteus* до нафтового забруднення ґрунту. Аналіз стану первинних процесів фотосинтезу у хлоропластах листків *M. × giganteus* здійснювали за допомогою інтактних, неінвазивних методів дослідження, які базуються на явищі флуоресценції хлорофілу *a*. Охарактеризовано зміни квантової ефективності ФС II та низки параметрів ОЖР-тесту у відповідь на токсичну дію нафтопродукту, а також проаналізовано вплив внесення біочару на ці показники. Встановлено, що внесення біочару в ґрунт, забруднений дизельним пальним, знижує токсичну дію останнього на міскантус, що виявилось у підвищенні ефективності використання енергії збудження молекулами хлорофілу в антенах ФС II, зниженні теплової дисипації енергії та підтриманні вищого вмісту хлорофілу. Це дає змогу ефективніше використовувати поглинуту світлову енергію листками та підтримувати функціональний стан фотосинтезу рослин. Встановлено, що найчутливішими до дії забруднення ґрунту дизельним пальним є нефотохімічне гасіння (φNPQ) та загальна кількість енергії, що розсіюється одним реакційним центром (DI₀/RC). Ці показники запропоновано використовувати як маркерні ознаки для оцінювання впливу стресорів. З'ясовано, що внесення 5 % біочару було достатнім для зниження стресу та оптимізації фотосинтетичних параметрів хлоропластів листків *M. × giganteus* в умовах росту рослин у забрудненому дизельним пальним ґрунті.

Ключові слова: *Miscanthus* × *giganteus* J.M. Greef & Deuter ex Hodkinson & Renvoiz, фотосинтез, флуоресценція хлорофілу, дизельне забруднення, біочар.

Одним із найнебезпечніших видів техногенного забруднення довкілля є забруднення ґрунту нафтою та її продуктами. Його негативний вплив пов'язаний із безпосередньою дією легких фракцій

Цитування: Герц А.І., Конончук О.Б., Герц Н.В., Підліснюк В.В., Хоменчук В.О., Пида С.В. Активність фотосинтетичного апарату *Miscanthus* × *giganteus* за умов забруднення ґрунту дизельним пальним і внесення біочару. *Фізіологія рослин і генетика*. 2022. 54, № 2. С. 161—176. <https://doi.org/10.15407/frg2022.02.161>

нафти на агрохімічні, агрофізичні й біологічні властивості ґрунту та, як наслідок, фізіолого-біохімічні і морфометричні параметри рослин. Забруднення ґрунту нафтою погіршує його фізико-хімічні властивості та порушує водно-повітряний режим, а відтак знижує доступність елементів мінерального живлення рослин [1–4]. Токсична дія нафтопродуктів запускає адаптаційні механізми рослин, зокрема призводить до зміни вмісту хлорофілів і каротиноїдів, фенолів, проліну, порушує гормональний баланс, сприяє синтезу стресових білків [3].

Для зниження токсичного впливу нафтового забруднення ґрунту застосовують певні ґрунтові добавки, в тому числі біочар (або біовуглець, біовугілля) — матеріал, який отримують піролізом біомаси [5]. Висока іонообмінна здатність і значна питома поверхня біочару зменшують вимивання біогенних елементів із ґрунтового середовища, пориста структура матеріалу стимулює створення сприятливих умов для існування мікроорганізмів, що підвищує родючість ґрунту [6]. Встановлено, що внесення біочару підвищує рН ґрунту, а його високий сорбційний потенціал впливає на концентрацію макро- та мікроелементів у ґрунтового середовищі й збільшує ефективність їх засвоєння рослинами [6, 7]. Також зростає вміст у ґрунті карбону, фосфору, калію, магнію та нітрогену. Зокрема зростання вмісту фосфору за внесення біочару зумовлено наявністю обмінної форми цього елемента у добриві й здатністю змінювати розчинність фосфоровмісних сполук у ґрунті [7]. Ще однією перевагою застосування біовугілля є зменшення екологічного навантаження на довкілля порівняно з класичними мінеральними добривами [8]. Проте виявлені й факти негативної дії біовугілля, зокрема на біорізноманіття ґрунтового середовища, зменшення кількості доступної рослинам води в глинистих ґрунтах, підвищення ймовірності засолення ґрунту [4].

Успішне проведення рекультиваційних заходів на нафтозабруднених територіях ускладнюється через гідрофобність та високу токсичність нафти, її вплив на водно-повітряний баланс і співвідношення основних макроелементів ґрунту — карбону та нітрогену [1]. Важливим шляхом оптимізації ґрунту на фоні нафтового забруднення є фітореMediaція [9]. Однією з відомих культур, що виявляє певний рівень толерантності до нафтового забруднення ґрунту, є міскантус [3, 10–12].

Якщо позитивна дія біочару за наявності у ґрунті нафтопродуктів на морфометричні параметри рослин показана в низці досліджень [3, 6, 7, 11], то механізми такого впливу вивчено ще недостатньо. Як відомо, адаптація рослинного організму до мінливих умов навколишнього середовища пов'язана зі змінами в засвоєнні й розподілі карбону та поживних речовин, що, у свою чергу, впливає на фотосинтетичний апарат, зокрема на перебіг первинних процесів фотосинтезу [13–15]. Актуальність дослідження функціонування механізмів регуляції фотосинтезу пов'язана з тим, що вони сприятимуть виявленню маркерів стійкості рослин до дії стресорів. З огляду на викладене ми порівняли параметри активності фотосинтетичного апарату *M. × giganteus* за умов дизельного забруднення ґрунту та внесення біочару в ґрунт за змінами параметрів флуоресценції хлорофілу *a*.

Метою роботи було дослідження показників фотосинтетичної діяльності як маркерів адаптаційної здатності *M. × giganteus* до нафтового забруднення ґрунту за наявності біочару.

Методика

Матеріалом дослідження слугували рослини міскантусу гігантського (*Miscanthus × giganteus* J.M. Greef & Deuter ex Hodkinson & Renvoiz) сорту Осінній зорецвіт, створеного в Інституті біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України.

Як нафтовий забруднювач використовували пальне для дизельних двигунів із автозаправки, як біочар — матеріал, виготовлений фірмою «Алмесо» (Чеська Республіка) з осаду стічних вод муніципальних очисних споруд [7].

Досліджували в теплиці Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка у ґрунтовій культурі. Маса субстрату в кожній вегетаційній посудині становила 15 кг, його вологість підтримували на рівні 60 % ПВ. Для вирощування рослин використовували чорнозем типовий, важкосуглинистий, слабогумусний без додавання (серія 1) та із домішуванням 5 % біочару за масою сухої речовини (серія 2) і дизельного пального у кількості: 0 (А); 0,25 г/кг (В); 1 г/кг (С); 3 г/кг (D) та 5 г/кг (Е) субстрату.

Фізіологічні показники стану й активності ФСА рослин вимірювали на повністю сформованих листках верхнього ярусу на 120-ту добу вегетації за допомогою портативних флуориметрів MultispeQ v1.0 (США) та FluorPen FP 110 (Чеська Республіка). Оцінку стану ФСА здійснювали на основі параметрів індукції флуоресценції хлорофілу *a* (ІФХ): $\Phi\Pi$ — квантова ефективність ФС II; NPQ — нефотохімічне гасіння, оцінене без темної адаптації листків; Φ NPQ — квантовий вихід NPQ; Φ NO — частка світлової енергії, що поглинається ФС II та втрачається через нерегульовані процеси; qL — частка відкритих реакційних центрів ФС II; Fv'/Fm' — максимальна квантова ефективність ФС II; ECSt — ємність АТФ-синтази; gH^+ — провідність АТФ-синтази; vH^+ — стаціонарний потік протонів [16, 17].

Після 15 хв адаптації листкових пластинок у темряві за допомогою флуориметра FluorPen FP 110 вимірювали: Q_y — квантовий вихід ФС II; M_o — швидкість закривання реакційних центрів ФС II; ΦP_o — максимальний квантовий вихід первинної фотохімічної реакції; ΦE_o — квантову ефективність перенесення електронів від Q_A ; ΦP_{av} — середній квантовий вихід первинних фотохімічних реакцій; TR_o/RC — потік енергії збудження, що вловлюється одним активним реакційним центром на початку освітлення; E_{t_o}/RC — потік електронів, перенесених через один активний реакційний центр; ΦD_o — квантову ефективність розсіювання енергії; DI_o/RC — загальну кількість енергії, яка розсіюється одним реакційним центром у вигляді теплоти, флуоресценції або перенесенням до іншої фотосистеми; ABS/RC — потік енергії, що поглинається ще одним активним реакційним центром [15, 18, 19].

Статистичні дані, зокрема описову статистику, обробляли за допомогою дисперсійного аналізу Anova з використанням критерію до-

стовірної різниці групових середніх Тьюкі (Honestly Significant Difference) із використанням програмного забезпечення RStudio (version 1.4.1103, R Studio PBC, 2021) та бібліотек psych і multcomp. Попередньо вибірки було оцінено на нормальність розподілу та однорідність дисперсії. Після аналізу дисперсії й спростування нульової гіпотези використано post-hoc аналіз — HSD тест Тьюкі.

Для узагальнення даних і виявлення взаємозв'язків між кількісними змінними застосовано багатовимірний аналіз — метод головних компонент (Principal Component Analysis) [20]. Процедура аналізу здійснювалась у середовищі RStudio з використанням бібліотеки — FactoMineR. Критичний рівень значущості статистичних гіпотез приймався за 0,05.

Результати та обговорення

Фотосинтетична здатність рослин здебільшого визначається вмістом фотосинтетичних пігментів, кількістю світла, що поглинається та засвоюється ФСА, і швидкістю засвоєння CO₂ [13, 14, 21]. Пігментна система рослин чутлива до забруднення середовища, а вміст хлорофілів у листках вважають одним із показників адаптації ФСА до несприятливих умов навколишнього середовища [2, 3, 11], у тому числі й нафтопродуктів [22].

Збільшення концентрації дизельного пального у ґрунті призвело до зменшення вмісту хлорофілу в листках *M. × giganteus*, проте це зниження у варіантах з внесенням 5 % біочару було меншим (рис. 1). Крім того, у варіантах із застосуванням біочару вміст цього фотосинтетичного пігменту перевищував відповідні значення в досліді з дизельним паливом.

Відомо, що у процесі фотосинтезу світлова енергія поглинається світлозбиральними комплексами (СЗК) і використовується для фото-

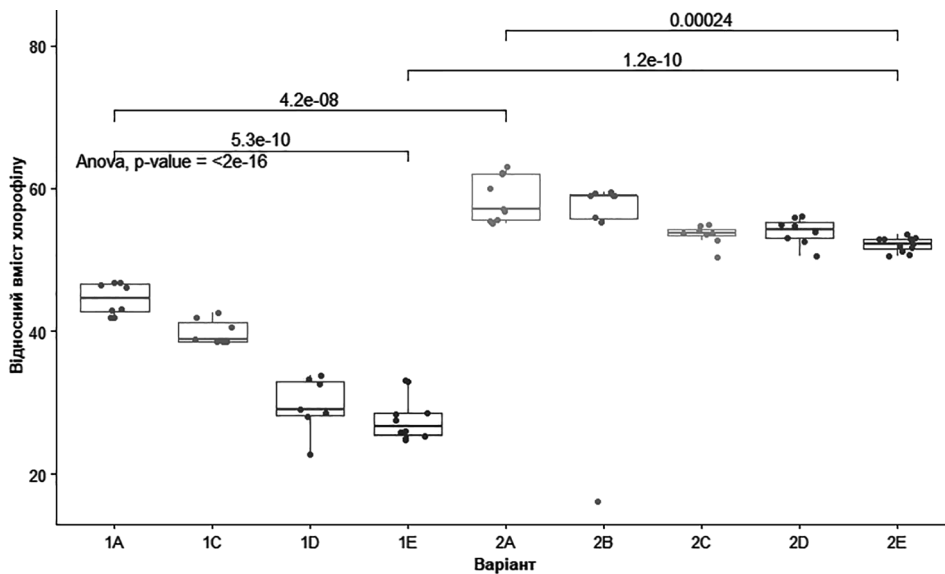


Рис. 1. Відносний вміст хлорофілу (SPAD) в листках *M. × giganteus* на 120-ту добу за дії дизельного пального і біочару

хімічних реакцій. Певна частка поглинутого світла втрачається через нефотохімічне гасіння хлорофілу (NPQ), що включає низку фотосинтетичних процесів, які задіяні в розсіюванні надлишкової енергії [14, 23, 24].

Оцінка параметра ABS/RC, що відображає співвідношення між кількістю молекул хлорофілу *a*, які зумовлюють флуоресценцію в антенних комплексах та активних реакційних центрах, показала, що наявність біочару в ґрунті стабілізує потік енергії, який поглинається одним реакційним центром фотосистеми II (РЦ ФС II) (таблиця). За відсутності добрива та зі збільшенням кількості пального у субстраті значення фізіологічного параметра, що характеризує потік енергії збудження, який потрапляє на один активний РЦ — TR₀/RC (рис. 2, а), зростає. Транспорт електронів через один РЦ (ET₀/RC) зі збільшенням кількості дизельного пального у субстраті без біочару, навпаки, істотно зменшується. Найістотніше його інгібування спостерігається у варіанті 1Е (див. рис. 2, б), тобто наявність біочару в ґрунті зменшує токсичний вплив дизельного пального до рівня значень у контролі, про що свідчить відсутність статистично вірогідної різниці між контрольним (1А) та дослідними варіантами 2А—2D (див. рис. 2, б).

Дизельне пальне у ґрунті впливає на частку відкритих РЦ ФС II (qL) та швидкість їх закривання (Mo). У варіанті 1Е (5 г/кг пального) Mo є найвищою, що вказує на наявність стресу у рослин (див.

Параметри флуоресценції хлорофілу *M. × giganteus* на 120-ту добу вегетації за дії дизельного пального і біочару ($M \pm SE$, $n = 10$)

Параметр флуоресценції	Кількість дизельного пального, внесеного в ґрунт, г/кг					
	0	0*	1	1*	5	5*
Mo	0,95±0,01	1,01±0,01 [#]	0,91±0,03	0,97±0,01 [#]	1,05±0,01	1,35±0,02 [#]
qL	0,75±0,01	0,75±0,02	0,79±0,01	0,78±0,005	0,80±0,01	0,76±0,01
φEo	0,42±0,01	0,40±0,01 [#]	0,42±0,01	0,40±0,01 [#]	0,37±0,02	0,28±0,01 [#]
φPav	901±1	954±1*	960±2	945±1 [#]	958±1	965±2 [#]
ABS/RC	2,51±0,01	2,61±0,03 [#]	2,40±0,03	2,49±0,02 [#]	2,52±0,02	2,96±0,06 [#]
DI ₀ /RC	0,48±0,01	0,53±0,01 [#]	0,45±0,01	0,52±0,01 [#]	0,51±0,01 [#]	0,76±0,03 [#]
φNO	0,18±0,01	0,17±0,01 [#]	0,17±0,01	0,17±0,01	0,17±0,01	0,17±0,01
ECSt	3,8e-04± ±8e-05	3,8e-04± ±5e-05	2,1e-04± ±2e-05	3e-04± ±2e-05 [#]	4e-04± ±3e-05	4e-04± ±1e-05
gH ⁺	57,7±9,0	72,2±15,4	107,8±6,6	87,9±8,43 [#]	40,0±4,61	55,7±9,1 [#]
vH ⁺	0,01±0,002	0,02±0,004 [#]	0,02±0,001	0,02±0,003	0,01±0,001	0,02±0,002 [#]

Примітка: * — ґрунт, забруднений дизельним паливом, без біочару; [#] — різниця з варіантом із внесенням біочару істотна за $p \leq 0,05$.

Умовні позначення: Mo — швидкість закривання реакційних центрів ФС II; qL — частка відкритих реакційних центрів ФС II; φEo — квантова ефективність перенесення електронів від Q_A; φPav — середній квантовий вихід первинних фотохімічних реакцій; ABS/RC — потік енергії, яка поглинута одним активним реакційним центром; DI₀/RC — загальна кількість енергії, яка розсіюється одним реакційним центром у вигляді теплоти, флуоресценції або перенесенням до іншої фотосистеми; φNO — частка світлової енергії, що поглинається ФС II та втрачається через нерегульовані процеси; ECSt — ємність АТФ-синтази; gH⁺ — провідність АТФ-синтази; vH⁺ — стаціонарний потік протонів.

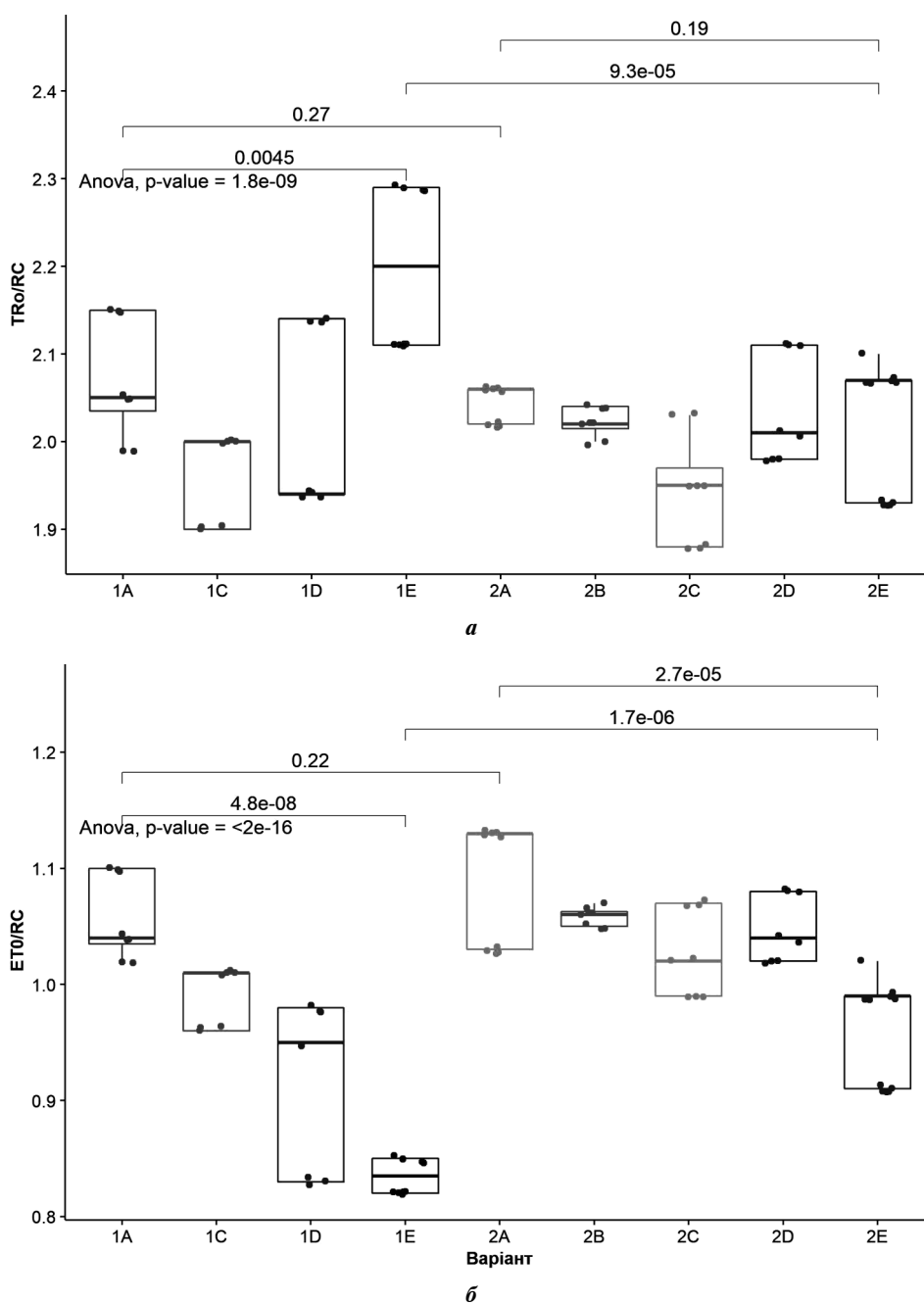


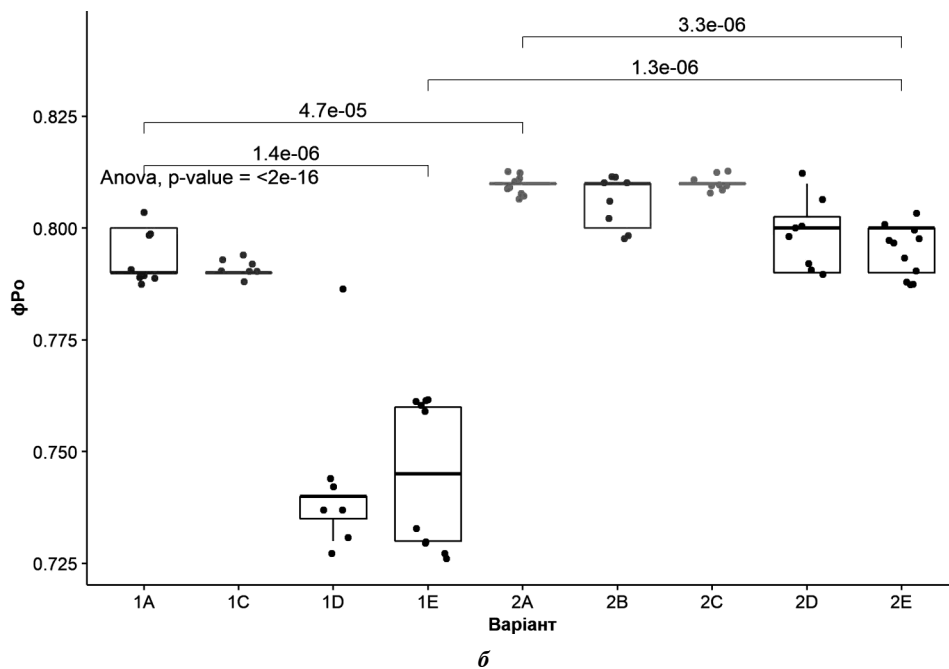
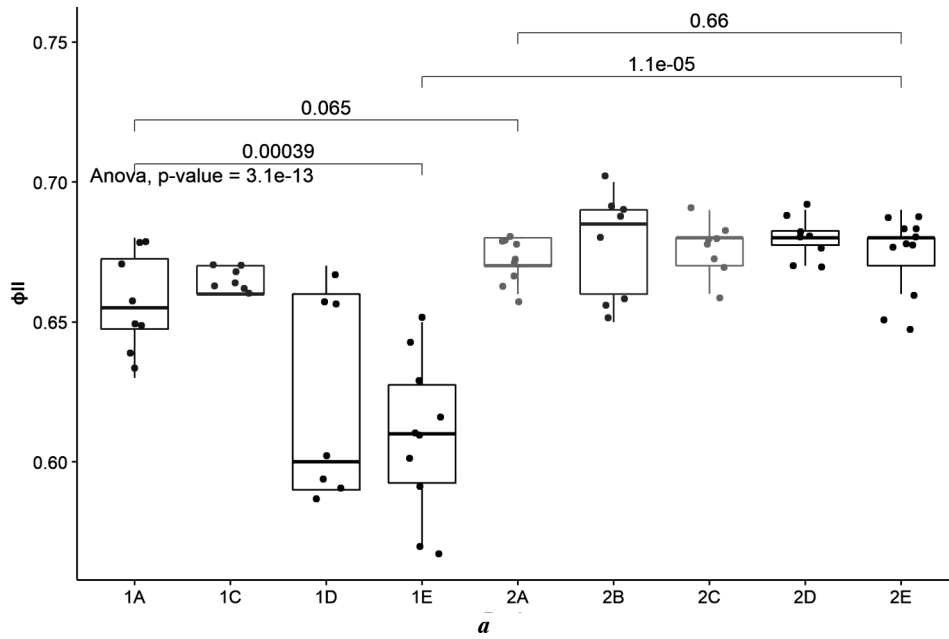
Рис. 2. Вплив дизельного пального і біоچارу на стан реакційних центрів ФС *Phaeocystis giganteus*:

a — потік енергії збудження, що вловлюється одним активним реакційним центром на початку освітлення (TR_0/RC); *b* — потік електронів, перенесених через один активний реакційний центр (ET_0/RC)

таблицю). Квантова ефективність перенесення електронів від відновленого QA (фЕо) за умов забруднення ґрунту дизельним паливом у концентраціях 3 і 5 г/кг різко знижується. За відсутності забруднювача та наявності у субстраті біоچارу (варіант 2A) фЕо порівняно з

контролем зростала. При цьому поріг токсичності пального на згаданий параметр флуоресценції за наявності біочару у ґрунті знизився і проявився лише за найвищого рівня забрудненості — 5 г/кг (варіант 2E) (див. таблицю, рис. 3, а).

Це зменшення швидкості закривання частки відкритих РЦ ФС II приводить до зростання дисипації енергії у вигляді теплоти (DI_0/RC) (див. таблицю, рис. 3, з) та показників квантової ефективності розсіювання енергії (ϕDo). Таке припущення підтверджує оцінка частки світлової енергії, що розсіюється у вигляді теплоти на рівні ФС II



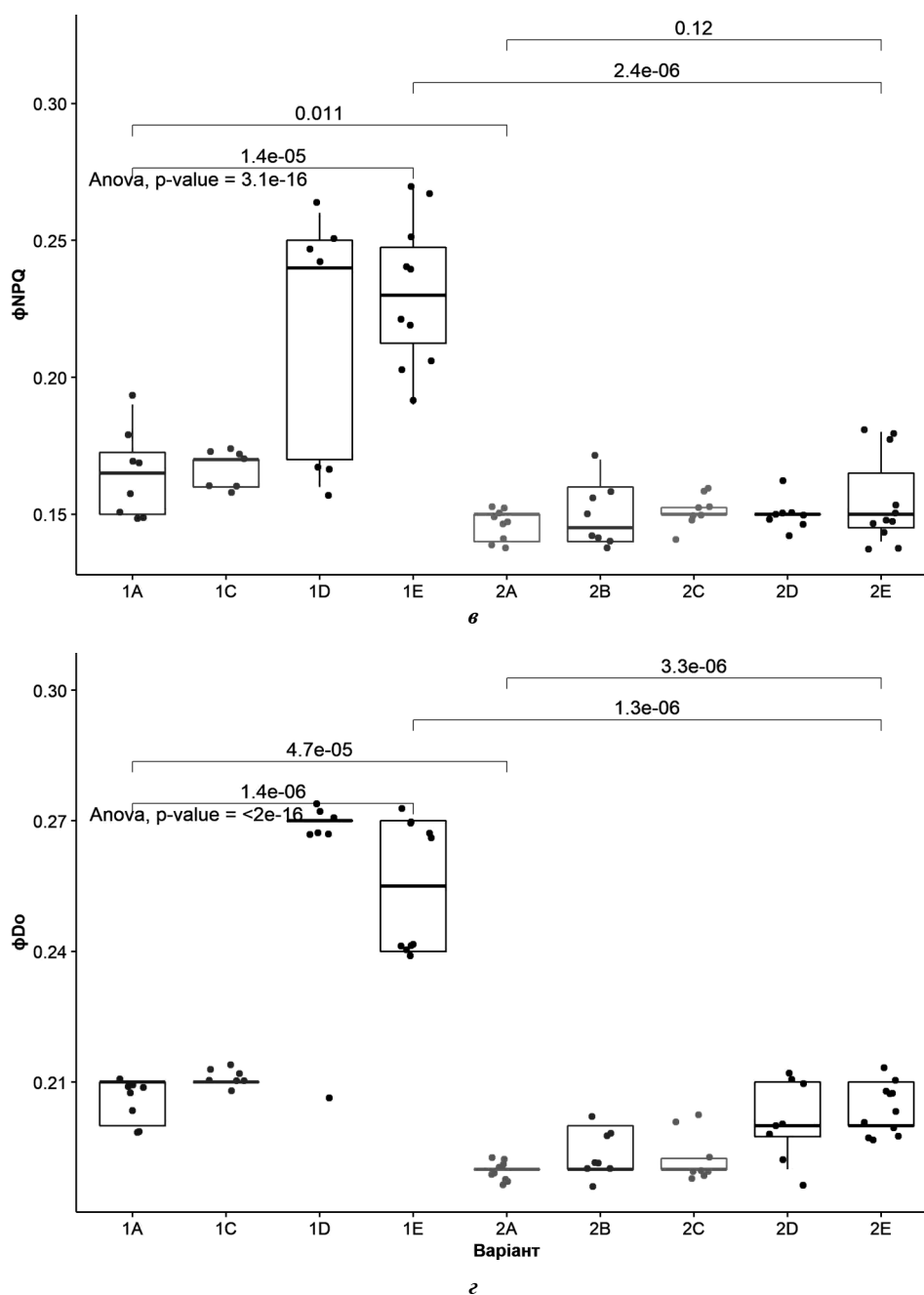


Рис. 3. Флуоресцентні показники листків *M. × giganteus* на 120-ту добу вегетації за дії дизельного пального і біочару:

a — квантова ефективність ФС II у світлоадаптованих листках; *b* — максимальний квантовий вихід первинної фотохімічної реакції (ϕP_o) після адаптації листків у темряві; ϕ — квантовий вихід NPQ у світлоадаптованих листків; *z* — квантова ефективність розсіювання енергії (ϕD_o) після адаптації листків у темряві

у рослин, які попередньо не були адаптовані до світла (ϕNPQ) (див. таблицю, рис. 3, *в*). Отже, за умов забруднення ґрунту дизельним паливом фізіологічні параметри DI_0/RC , ϕNPQ у листках *M. × gigan-*

teus істотно зростають. Наявність біочару зумовлює зниження нефотохімічного гасіння флуоресценції хлорофілу. Статистично вірогідні відмінності між варіантами 1Е та 2Е можуть бути пов'язаними з вищою ефективністю фотосинтетичних процесів у листках рослин у варіанті з додаванням біочару (див. рис. 3, в, г).

Таким чином, внесення у забруднений дизельним паливом ґрунт біочару підвищує ефективність використання енергії збудження захопленої молекулами хлорофілу в антенах ФС II. Кількість активних центрів ФС II, яка під час збільшення концентрації нафтопродукту в ґрунті зазвичай зменшувалась [22], у варіантах з біочаром залишалась майже незмінною, тобто наявність біовуглецю у ґрунті знижує ймовірність перетворення активних центрів ФС II в місце дисипації енергії. Теоретично це має збільшити потік електронів на відновлення Q_A , і в результаті інтенсифікувати фотохімічні реакції та зменшити ушкодження ФСА дизельним паливом.

Відтак встановлено, що внесення 5 % біочару в ґрунт сприяло підвищенню максимального квантового виходу первинних фотохімічних процесів (ϕ_{Po}) (див. рис. 3, б) у листках міскантусу та квантової ефективності транспорту електронів від Q_A (ϕ_{Eo}) щонайменше на 5–7 %. У забрудненому дизельним паливом ґрунті знижувалась шкодочинна дія забруднювача і лише за внесення у ґрунт нафтопродукту в кількості 5 г/кг, виявлено інгібування зазначених фотосинтетичних показників (див. таблицю).

Подібні результати були отримані за оцінкою квантового виходу ФС II (ϕ_{II}). У рослин міскантусу, які безпосередньо перед вимірюванням флуоресцентних показників не піддавались темновій адаптації, за вмісту у ґрунті дизпального 3 та 5 г/кг, істотно знижувався ϕ_{II} . За наявності 5 % біочару в субстраті та зазначеної кількості забруднювача ефективність фотохімічних реакцій статистично вірогідно не змінювалась. Спостерігалась тенденція до зниження квантового виходу фотохімічних процесів ФС II (див. рис. 3, а).

Поряд із зазначеними шляхами використання рослиною енергії світла — фотохімічні реакції, дисипація у вигляді теплоти, флуоресценція — певна частка квантів світла викликає і нерегульовані процеси (ϕ_{NO}) на рівні ФСА рослин [17]. Потрібно зауважити, що за кількості дизпального в ґрунті 3–5 г/кг зниження інтенсивності фотохімічної реакції ϕ_{II} переважно пов'язане зі збільшенням ϕ_{NPQ} та зі зменшенням лише у варіантах 1Е і 2Е ϕ_{NO} . Це може бути ознакою стресу, який виник за вмісту 5 г/кг нафтопродуктів у ґрунті і характеризується, як описано в праці [25], зростанням рівня ϕ_{NPQ} та меншим значенням ϕ_{NO} (див. таблицю).

Відомо, що за умов штучного стресу головним механізмом захисту від утворення активних форм кисню залишається механізм світлозалежної дисипації енергії через взаємоперетворення триплетного стану збудження молекули хлорофілу — нефотохімічне гасіння хлорофілу [13, 14, 21, 26]. Можна припустити, що зниження вмісту хлорофілу разом зі збільшенням NPQ свідчить про дисоціацію СЗК від центрів фотосинтетичної реакції, що розглядається як адаптивна стратегія рослин у напрямі зменшення пошкодження ФСА [23, 26].

Нефотохімічне гасіння енергії включає в себе певні компоненти і реалізується кількома шляхами. Доведено, що трансмембранний градієнт рН (ΔpH) поперек тилакоїдної мембрани хлоропласту здатний ініціювати фотопротекторний механізм ФС II від перезбудження [13, 14]. Значення параметра ECSt, який, згідно з літературними даними [17, 27], є індикатором світлоіндукованої зміни рН тилакоїдного простору, між варіантами не відрізнялись (див. таблицю). Вірогідної різниці між параметрами, які описують протонну провідність АТФ-синтази (gH^+), стаціонарний потік протонів (vH^+), не визначено. Отже, дисбалансу між наявністю протонів та їхнім використанням для синтезу АТФ, який може призводити до підкислення просвіту тилакоїду хлоропласту, а відтак індукування фотозахисних процесів ϕNPQ , не простежується [28].

Нині існує недостатньо даних стосовно вибору параметрів вимірювань, що базуються на виході флуоресценції, які б могли слугувати для ідентифікації стресу у рослин, вирощених на забруднених нафтопродуктами ґрунтах. Для виявлення таких маркерів методом головних компонент було проаналізовано взаємозв'язки між параме-

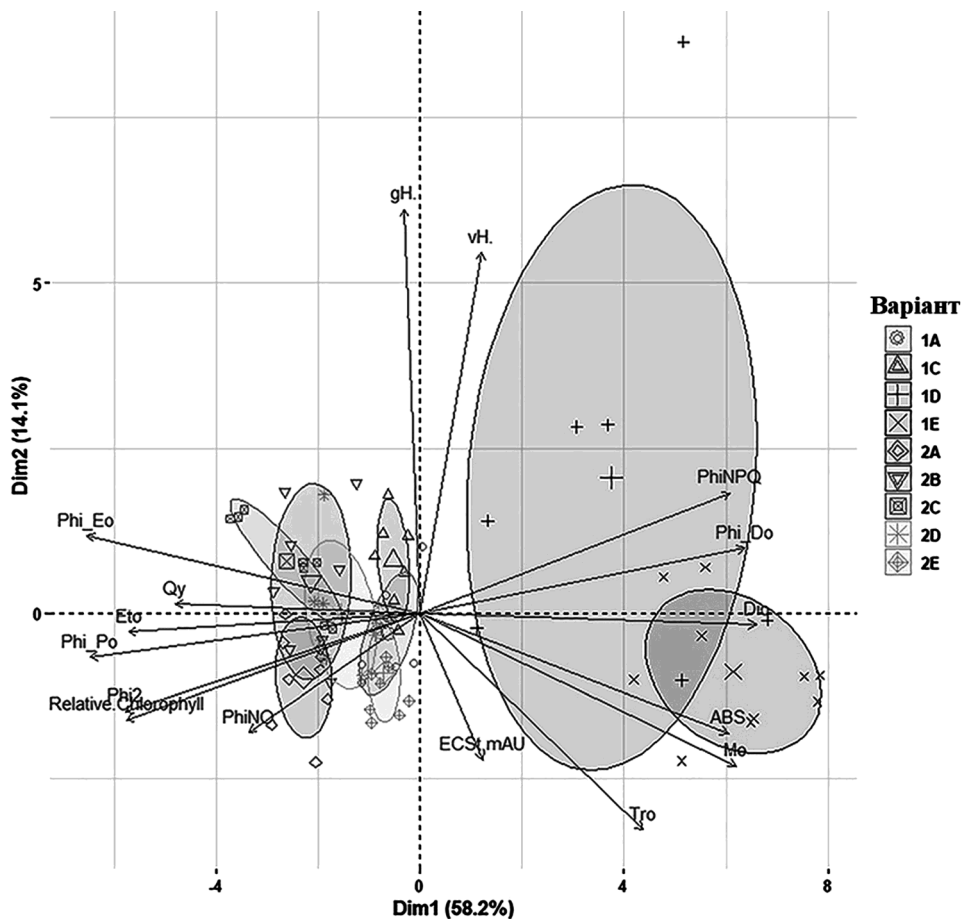


Рис. 4. МГК-аналіз параметрів флуоресценції хлорофілу рослин *M. x giganteus*, їх зв'язку із вмістом дизельного пального та біоچارу в ґрунті (суцільні кола представляють дослідні варіанти; аббревіатури наведено в тексті)

трами флуоресценції хлорофілу *a*, що характеризують емісію енергії світлового випромінювання у вигляді теплоти, використовуються на фотохімічні реакції, відносним вмістом пігментів у листках рослин та рівнем забруднення ґрунту дизельним паливом. Оскільки фізіологічні параметри мають різну чутливість до стресових чинників, їхній внесок у формування ГК є неоднаковим (рис. 4). Сформовані на основі кореляційних зв'язків нові координати параметрів флуоресценції увійшли з певним ваговим коефіцієнтом у новосформовані головні компоненти (ГК). Дві новосформовані ГК пояснюють 73 % варіації досліджуваних фізіологічних параметрів фотосинтезу.

Запропонований підхід візуально підтверджує, що SPAD, ϕP_o , ϕII , ϕE_o , E_t_0/RC негативно корелюють з такими параметрами флуоресценції, як ϕNPQ , ϕD_o , D_i_0/RC , ABS, Mo, Tr_0/RC : контроль (1A) та варіант 2A локалізуються на протилежному від 1D, 1E боці та чітко відмежовані. Варіанти, що зміщуються від контролю по осі координат в керунку ϕNPQ , ϕD_o , D_i_0/RC , знаходяться в стресових умовах. Це означає, що параметри флуоресценції можуть бути використані як маркери зумовленого нафтопродуктами стресу. Такими специфічними показниками для рослин міскантусу за дії дизельного пального є E_t_0/RC , SPAD, ϕD_o , D_i_0/RC та ϕNPQ . Два останні пов'язані з роботою РЦ та характеризують дисипацію енергії на рівні СЗК.

Можна припустити, що всі зазначені зміни на рівні первинних процесів ФСА зумовлені прямою чи опосередкованою негативною дією дизельного пального на біосинтез хлорофілів [11], зокрема через дефіцит надходження поживних речовин [7].

Отже, внесення біочару в ґрунт підвищувало фотохімічну ефективність та знижувало рівень регульованого розсіювання світлової енергії у вигляді теплоти, спричинену дією дизельного пального на ФСА листків *M. × giganteus*. 5 %-й вміст добрива у субстраті сприяв стабілізації роботи ФСА рослин за рахунок вищого порівняно з контролем рівня хлорофілу в паренхімі листка. Ключове значення у цьому може належати нітрогену, який, за результатами наших попередніх досліджень [7], є одним із визначальних чинників ефективності та доцільності використання біочару [29]. Застосування біочару є ефективним методом для підтримання функціонального стану ФСА рослин, які зазнають антропогенного навантаження у ґрунтах, забруднених нафтопродуктами.

Встановлено, що найчутливішим до дії забруднення ґрунту дизельним паливом є нефотохімічне гасіння та загальна кількість енергії, яка розсіюється одним реакційним центром.

Таким чином, виявлено маркерні параметри флуоресценції, які можуть бути використані для оцінювання стресу.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Shukry W., Al-Hawas G., Al-Moaik R., El-Bendary M. Effect of Petroleum Crude Oil on Mineral Nutrient Elements and Soil Properties of Jojoba Plant (*Simmondsia chinensis*). *Acta Bot. Hung.* 2013, **55**, Iss. 1–2. P. 117–133. <https://doi.org/10.1556/abot.55.2013.1-2.8>
2. Baruah P., Saikia R.R., Baruah P.P., Deka S. Effect of Crude Oil Contamination on the Chlorophyll Content and MorphoAnatomy of *Cyperus brevifolius* (Rottb.) Hassk. *Environ*

- Sci Pollut Res.* 2014, **21**, Iss. 21. P. 12530—12538. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3195-y>
3. Терек О.І. Механізми адаптації рослин до нафтового забруднення. *Біологічні студії*. 2018. **12**, № 3—4. С. 141—164. <https://doi.org/10.30970/sbi.1203.579>
 4. Brtnicky M., Datta R., Holatko J., Bielska L., Gusiatin Z.M., Kucerik J., Hammerschmidt T., Danish S., Radziemska M., Mravcova L., Fahad S., Kintl A., Sudoma M., Ahmed N., Pecina V. A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment (Review). *Sci. Total Environ.* 2021. **796**, 148756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148756>
 5. Tomczyk A., Sokolowska Z., Boguta P. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environ. Sci. and Bio/Technol.* 2020. **19**, Iss. 1. P. 191—215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
 6. Yang Ding, Yunguo Liu, Shaobo Liu, Zhongwu Li, Xiaofei Tan, Xixian Huang, Guangming Zeng, Lu Zhou, Bohong Zheng. Biochar to improve soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 2016. **36**, Iss. 2, 36. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>
 7. Pidlisnyuk V., Herts A., Khomenchuk V., Mamirova A., Kononchuk O., Ust'ak S. Dynamic of Morphological and Physiological Parameters and Variation of Soil Characteristics during *Miscanthus* *r giganteus* Cultivation in the Diesel-Contaminated Land. *Agronomy*. 2021. **11**, Iss. 4, 798. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040798>
 8. Saletnik B., Zagula G., Bajcar M., Czernicka M., Puchalski C. Biochar and Biomass Ash as a Soil Ameliorant: The Effect on Selected Soil Properties and Yield of Giant *Miscanthus* (*Miscanthus r giganteus*). *Energies*. 2018. **11**, Iss. 10, 2535. <https://doi.org/10.3390/en11102535>
 9. Susarla S., Medina V.F., McCutcheon S.C. Phytoremediation: An Ecological Solution to Organic Chemical Contamination. *Ecol. Eng.* 2002. **18**, Iss. 5. P. 647—658. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00026-5)
 10. Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Lewis E.E., Erickson L.E., Davis L.C. *Miscanthus* as a Productive Biofuel Crop for Phytoremediation. *Crit. Rev. Plant Sci.* 2014, **33**, Iss. 1. P. 1—19. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.847616>
 11. Подан І.І., Джура Н.М. Вплив нафтового забруднення і гуматів на ріст рослин міскантусу. *Екологічні науки*. 2019. № 2 (25). С. 182—186. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-30>
 12. Hutsol T., Glowacki S., Mudryk K., Yermakov S., Kucher O., Knapczyk A., Muliarchuk O., Koberniuk O., Kovalenko N., Kovalenko V., Ovcharuk O., Prokopchuk L. Agrobiomass of Ukraine — Energy Potential of Central and Eastern Europe (Engineering, Technology, Innovation, Economics): monograph. Warsaw: Libra-Print, 2021. 136 p. <http://dglib.nubip.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/8102>
 13. Шадчина Т.М., Гуляев Б.І., Кірізій Д.А., Стасик О.О., Прядкіна Г.О., Стороженко В.О. Регуляція фотосинтезу і продуктивність рослин: фізіологічні та екологічні аспекти. Київ: Фітосоціоцентр, 2006. 384 с.
 14. Киризій Д.А., Стасик О.О., Прядкіна Г.А., Шадчина Т.М. Фотосинтез: асиміляція CO₂ и механизмы ее регуляции: монография. в 3-х т. Киев: Логос, 2014. Т. 2. 480 с.
 15. Kalaji H.M., Schansker G., Brestic M., Bussotti F., Calatayud A., Ferroni L., Goltsev V., Guidi L., Jajoo A., Li P., Losciale P., Mishra V.K., Misra A.N., Nebauer S.G., Pancaldi S., Penella C., Pollastrini M., Suresh K., Tambussi E., Yannicari M., Zivcak M., Cetner M.D., Samborska I.A., Stirbet A., Olsovska K., Kunderlikova K., Shelonzek H., Rusinowski S., Bąba W. Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel. *Photosynthesis Res.* 2017. **132**, Iss. 1. P. 13—66. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27815801>
 16. Kramer D.M., Johnson G., Kiirats O., Edwards G.E. New Fluorescence Parameters for the Determination of QA Redox State and Excitation Energy Fluxes. *Photosynthesis Res.* 2004. **79**, Iss. 2, 209. <https://doi.org/10.1023/B:PRES.0000015391.99477.0d>
 17. Kuhlgerg S., Austic G., Zegarac R., Osei-Bonsu I., Hoh D., Chilvers M.I., Roth M.G., Bi K., TerAvest D., Weebadde P., Kramer D.M. MultispeQ Beta: A Tool for Large-Scale Plant Phenotyping Connected to the Open PhotosynQ Network. *R Soc Open Sci.* 2016. **3**, Iss. 10, 160592. <https://doi.org/10.1098/rsos.160592>
 18. Genty B., Briantais J.-M., Baker N.R. The Relationship between the Quantum Yield of Photosynthetic Electron Transport and Quenching of Chlorophyll Fluorescence.

- Biochim. Biophys. Acta — Gen. Subj.* 1989. **990**, Iss. 1. P. 87–92. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(89)80016-9)
19. Гольцев В.Н., Каладжи М.Х., Кузманова М.А., Аллахвердиев С.И. Переменная и замедленная флуоресценция хлорофилла *a* — теоретические основы и практическое приложение в исследовании растений. Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 220 с.
 20. Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis*. Second Edition. NY, New York: Springer, 2002. 488 p. <https://doi.org/10.1007/b98835>
 21. Стасик О.О., Кирізі́й Д.А., Прядкіна Г.О. Фотосинтез і продуктивність: основні наукові досягнення та інноваційні розробки. *Фізіологія рослин і генетика*. 2021. **53**, № 2. С. 160—184. <https://doi.org/10.15407/frg2021.02.160>
 22. Netto A.T., Campostrini E., de Oliveira J.G., Bressan-Smith R.E. Photosynthetic Pigments, Nitrogen, Chlorophyll *a* Fluorescence and SPAD-502 Readings in Coffee Leaves. *Scientia Horticulturae*. 2005. **104**, Iss. 2. P. 199—209. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.08.013>
 23. Kanazawa A., Kramer D.M. In vivo modulation of nonphotochemical exciton quenching (NPQ) by regulation of the chloroplast ATP synthase. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2002. **99**, № 20. P. 12789—12794. <https://doi.org/10.1073/pnas.182427499>
 24. Bielczynski L.W., Łączki M.K., Hoefnagels I., Gambin A., Croce R. Leaf and Plant Age Affects Photosynthetic Performance and Photoprotective Capacity. *Plant Physiol*. 2017. **175**, Iss. 4. P. 1634—1648. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00904>
 25. Ben-Jabeur M., Gracia-Romero A., Lypez-Cristoffanin C., Vicente R., Kthiri Z., Kefauver S.C., Lypez-Carbonell M., Serret M.D., Araus J.L., Hamada W. The promising MultispeQ device for tracing the effect of seed coating with biostimulants on growth promotion, photosynthetic state and water-nutrient stress tolerance in durum wheat. *Euro-Mediterr J. Environ Integr*. 2021. **6**, Iss. 1, 8. <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00213-8>
 26. Tietz S., Hall C.C., Cruz J.A., Kramer D.M. NPQ(T): A Chlorophyll Fluorescence Parameter for Rapid Estimation and Imaging of Non-Photochemical Quenching of Excitons in Photosystem-II-Associated Antenna Complexes. *Plant, Cell & Environment*. 2017. **40**, Iss. 8. P. 1243—1255. <https://doi.org/10.1111/pce.12924>
 27. Kanazawa A., Ostendorf E., Kohzuma K., Hoh D., Strand D.D., Sato-Cruz M., Savage L., Cruz J.A., Fisher N., Froehlich J.E., Kramer D.M. Chloroplast ATP Synthase Modulation of the Thylakoid Proton Motive Force: Implications for Photosystem I and Photosystem II Photoprotection. *Front. Plant Sci*. 2017. **8**. P. 719. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00719>
 28. Rott M., Martins N.F., Thiele W., Lein W., Bock R., Kramer D.M., Schöttler M.A. ATP synthase repression in tobacco restricts photosynthetic electron transport, CO₂ assimilation, and plant growth by overacidification of the thylakoid lumen. *Plant Cell*. 2011. **23**, Iss. 1. P. 304—321. <https://dx.doi.org/10.1105/tpc.110.079111>
 29. Wang S., Zheng J., Wang Yu., Yang Q., Chen T., Chen Y., Chi D., Xia G., Siddique K.H.M., Wang T. Photosynthesis, Chlorophyll Fluorescence, and Yield of Peanut in Response to Biochar Application. *Front. Plant Sci*. 2021. **12**, 650432. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.650432>

Отримано 15.02.2022

REFERENCES

1. Shukry, W., Al-Hawas, G., Al-Moaik, R. & El-Bendary, M. (2013). Effect of Petroleum Crude Oil on Mineral Nutrient Elements and Soil Properties of Jojoba Plant (*Simmondsia chinensis*). *Acta Bot. Hung.*, 55, Iss. 1—2, pp. 117-133. <https://doi.org/10.1556/abot.55.2013.1-2.8>
2. Baruah, P., Saikia, R.R., Baruah, P.P. & Deka, S. (2014). Effect of Crude Oil Contamination on the Chlorophyll Content and MorphoAnatomy of *Cyperus brevifolius* (Rottb.) Hassk. *Environ Sci Pollut Res.*, 21, Iss. 21, pp. 12530-12538. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3195-y>
3. Terek, O.I. (2018). Mechanisms of plant adaptation to oil pollution. *Studia Biologica*, 12, No. 3—4, pp. 141-164 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30970/sbi.1203.579>

4. Brtnicky, M., Datta, R., Holatko, J., Bielska, L., Gusiatin, Z.M., Kucerik, J., Hammerschmidt, T., Danish, S., Radziemska, M., Mravcova, L., Fahad, S., Kintl, A., Sudoma, M., Ahmed, N. & Pecina, V. (2021). A critical review of the possible adverse effects of biochar in the soil environment (Review). *Sci. Total Environ.*, 796, 148756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148756>
5. Tomczyk, A., Sokolowska, Z. & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environ. Sci. and Bio/Technol.*, 19, Iss. 1, pp. 191-215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
6. Yang, Ding, Yunguo, Liu, Shaobo, Liu, Zhongwu, Li, Xiaofei, Tan, Xixian, Huang, Guangming, Zeng, Lu, Zhou & Bohong, Zheng (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 36, Iss. 2, 36. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>
7. Pidlisnyuk, V., Herts, A., Khomenchuk, V., Mamirova, A., Kononchuk, O. & Ust'ak, S. (2021). Dynamic of Morphological and Physiological Parameters and Variation of Soil Characteristics during *Miscanthus × giganteus* Cultivation in the Diesel-Contaminated Land. *Agronomy*, 11, Iss. 4, 798. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040798>
8. Saletnik, B., Zagula, G., Bajcar, M., Czernicka, M. & Puchalski, C. (2018). Biochar and Biomass Ash as a Soil Ameliorant: The Effect on Selected Soil Properties and Yield of Giant *Miscanthus* (*Miscanthus × Giganteus*). *Energies*, 11, Iss. 10, 2535. <https://doi.org/10.3390/en11102535>
9. Susarla, S., Medina, V.F. & McCutcheon, S.C. (2002). Phytoremediation: An Ecological Solution to Organic Chemical Contamination. *Ecol. Eng.*, 18, Iss. 5, pp. 647-658. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00026-5)
10. Pidlisnyuk, V., Stefanovska, T., Lewis, E.E., Erickson, L.E. & Davis, L.C. (2014). *Miscanthus* as a Productive Biofuel Crop for Phytoremediation. *Crit. Rev. Plant Sci.*, 33, Iss. 1, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.847616>
11. Podan, I.I. & Dzhura, N.M. (2019). Influence of oil pollution and humates on growth of *miscanthus* plants. *Ecological Sciences*, 2019, No. 2 (25), pp. 182-186 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-30>
12. Hutsol, T., Glowacki, S., Mudryk, K., Yermakov, S., Kucher, O., Knapczyk, A., Muliarchuk, O., Koberniuk, O., Kovalenko, N., Kovalenko, V., Ovcharuk, O. & Prokopchuk, L. (2021). *Agrobiomass of Ukraine — Energy Potential of Central and Eastern Europe (Engineering, Technology, Innovation, Economics): monograph*. Warsaw: Libra-Print. <http://dglb.nubip.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/8102>
13. Shadchina, T.M., Gulyaev, B.I., Kiriziy, D.A., Stasik, O.O., Pryadkina, G.O. & Storozhenko, V.O. (2006). Regulation of photosynthesis and productivity of plants. Physiological and ecological aspects. Kyiv: Ukrainian Phytosociological Center [in Ukrainian].
14. Kiriziy, D.A., Stasik, O.O., Pryadkina, G.A. & Shadchina, T.M. (2014). Photosynthesis, Vol. 2, Assimilation of CO₂ and the mechanisms of its regulation. *Logos*, Kyiv [in Russian].
15. Kalaji, H.M., Schansker, G., Brestic, M., Bussotti, F., Calatayud, A., Ferroni, L., Goltsev, V., Guidi, L., Jajoo, A., Li, P., Losciale, P., Mishra, V.K., Misra, A.N., Nebauer, S.G., Pancaldi, S., Penella, C., Pollastrini, M., Suresh, K., Tambussi, E., Yannicari, M., Zivcak, M., Cetner, M.D., Samborska, I.A., Stirbet, A., Olsovska, K., Kunderlikova, K., Shelonzek, H., Rusinowski, S. & Bąba, W. (2017). Frequently asked questions about chlorophyll fluorescence, the sequel. *Photosynth Res.*, 132, Iss.1, pp. 13-66. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27815801>
16. Kramer, D.M., Johnson, G., Kiirats, O. & Edwards, G.E. (2004). New Fluorescence Parameters for the Determination of QA Redox State and Excitation Energy Fluxes. *Photosynthesis Research*, 79, Iss. 2, 209. <https://doi.org/10.1023/B:PRES.0000015391.99477.0d>
17. Kuhlert, S., Austic, G., Zegarac, R., Osei-Bonsu, I., Hoh, D., Chilvers, M.I., Roth, M.G., Bi, K., TerAvest, D., Weebadde, P. & Kramer, D.M. (2016). MultispeQ Beta: A Tool for Large-Scale Plant Phenotyping Connected to the Open PhotosynQ Network. *R Soc Open Sci.*, 3, Iss. 10, 160592. <https://doi.org/10.1098/rsos.160592>
18. Genty, B., Briantais, J.-M. & Baker, N.R. (1989). The Relationship between the Quantum Yield of Photosynthetic Electron Transport and Quenching of Chlorophyll Fluorescence. *Biochim. Biophys. Acta — Gen. Subj.*, 990, Iss. 1, pp. 87-92. [https://doi.org/10.1016/S0304-4165\(89\)80016-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4165(89)80016-9)

19. Goltsev, V.N., Kalaji, M.H., Kouzmanova, M.A. & Allakhverdiev, S.I. (2014). Variable and Delayed Chlorophyll a Fluorescence — Basics and Application in Plant Sciences. Moscow—Izshevsk: Institute of Computer Sciences [in Russian].
20. Jolliffe, I.T. (2002). Principal Component Analysis. Second Edition. NY, New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/b98835>
21. Stasik, O.O., Kiriziy, D.A. & Priadkina, G.O. (2021). Photosynthesis and productivity: main scientific achievements and innovative developments. Plant Physiology and Genetics, 53, No. 2. pp. 160-184 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2021.02.160>
22. Netto, A.T., Campostrini, E., de Oliveira, J.G. & Bressan-Smith, R.E. (2005). Photosynthetic Pigments, Nitrogen, Chlorophyll a Fluorescence and SPAD-502 Readings in Coffee Leaves. Scientia Horticulturae, 104, Iss. 2, pp. 199-209. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.08.013>
23. Kanazawa, A & Kramer, D.M. (2002). In vivo modulation of nonphotochemical excitation quenching (NPQ) by regulation of the chloroplast ATP synthase. PNAS, 99, Iss. 20, pp. 12789-12794. <https://doi.org/10.1073/pnas.182427499>
24. Bielczynski, L.W., Łacki, M.K., Hoefnagels, I., Gambin, A., & Croce, R. (2017). Leaf and Plant Age Affects Photosynthetic Performance and Photoprotective Capacity. Plant Physiol., 175, Iss. 4, pp. 1634-1648. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00904>
25. Ben-Jabeur, M., Gracia-Romero, A., Lypez-Cristoffanin, C., Vicente, R., Kthiri, Z., Kefauver, S.C., Lypez-Carbonell, M., Serret, M.D., Araus, J.L. & Hamada, W. (2021). The promising MultispeQ device for tracing the effect of seed coating with biostimulants on growth promotion, photosynthetic state and water–nutrient stress tolerance in durum wheat. Euro-Mediterr J Environ Integr., 6, Iss. 1, 8. <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00213-8>
26. Tietz, S., Hall, C.C., Cruz, J.A. & Kramer, D.M. (2017). NPQ(T): A Chlorophyll Fluorescence Parameter for Rapid Estimation and Imaging of Non-Photochemical Quenching of Excitons in Photosystem-II-Associated Antenna Complexes. Plant, Cell & Environment., 40, Iss. 8, pp. 1243-1255. <https://doi.org/10.1111/pce.12924>
27. Kanazawa, A., Ostendorf, E., Kohzuma, K., Hoh, D., Strand, D.D., Sato-Cruz, M., Savage, L., Cruz, J.A., Fisher, N., Froehlich, J.E. & Kramer, D.M. (2017). Chloroplast ATP Synthase Modulation of the Thylakoid Proton Motive Force: Implications for Photosystem I and Photosystem II Photoprotection. Front. Plant Sci., 8, 719. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.00719>
28. Rott, M., Martins, N.F., Thiele, W., Lein, W., Bock, R., Kramer, D.M. & Schöttler, M.A. (2011). ATP synthase repression in tobacco restricts photosynthetic electron transport, CO₂ assimilation, and plant growth by overacidification of the thylakoid lumen. Plant Cell, 23, Iss. 1, pp. 304-321. <https://dx.doi.org/10.1105/tpc.110.079111>
29. Wang, S., Zheng, J., Wang, Yu., Yang, Q., Chen, T., Chen, Y., Chi, D., Xia, G., Siddique, K.H.M. & Wang, T. (2021, May). Photosynthesis, Chlorophyll Fluorescence, and Yield of Peanut in Response to Biochar Application. Front. Plant Sci., 12, 650432. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.650432>

Received 15.02.2022

REACTION OF *MISCANTHUS* × *GIGANTEUS* PHOTOSYNTHETIC APPARATUS TO DIESEL POLLUTION AND SOIL RESTORATION BY BIOCHAR

A.I. Herts¹, O.B. Kononchuk¹, N.V. Herts¹, V.V. Pidlisnyuk², V.O. Khomenchuk¹, S.V. Pyda¹

¹Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University

2 M. Kryvonosa St., Ternopil, 46027, Ukraine

²Jan Evangelista Purkyně University in Ústí nad Labem

3632/15 Pasteurova St., Ústí nad Labem, 400 96, Czech Republic

e-mail: herts@chem-bio.com.ua

In the conditions of vegetation experiment the photosynthetic apparatus features of the of *Miscanthus* × *giganteus* leaves have been studied under the influence of soil contamination by diesel fuel (0.25–5 g/kg) and application of biochar fertilizer (5 %). The aim was to

research the photosynthetic activity parameters as markers of the adaptability of the plant *M. × giganteus* to oil contamination of the soil. Analysis of the state of the primary processes of photosynthesis in the chloroplasts of *M. × giganteus* leaves has been carried out using intact, non-invasive research methods based on the phenomenon of chlorophyll fluorescence *a*. Changes in the quantum efficiency of FS II and some parameters of the OJIP test in response to the toxic effects of petroleum products have been described, and the effect of biochar application on these indicators has been analyzed. It has been found that the introduction of biochar into the diesel-contaminated soils reduces the toxic effects of pollutants on miscanthus, which manifested itself in increasing the efficiency of excitation energy by chlorophyll molecules in FS II antennas, reducing thermal energy dissipation and maintaining higher chlorophyll content. This allows you to more efficiently use the absorbed light energy by the leaves and maintain the functional state of photosynthesis of plants. Non-photochemical quenching (ϕ NPQ) and dissipated energy flux per one reaction center (DI_0/RC) are the most sensitive to the effects of soil pollution by diesel have been found. It is proposed to use these indicators as markers for assessing the impact of stressors. It has been ascertained that the application of 5 % biochar was sufficient to reduce stress and optimize the photosynthetic parameters of chloroplasts of *M. × giganteus* leaves under conditions of plant growth in diesel-contaminated soils.

Key words: *Miscanthus × giganteus* J.M. Greff & Deuter ex Hodkinson & Renvoiz, photosynthesis, chlorophyll fluorescence, diesel pollution, biochar.