



ВМІСТ ПІГМЕНТІВ У ЛИСТКАХ ДЕКОРАТИВНИХ ЗЛАКІВ В УМОВАХ СТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

Ольга ЗУБРОВСЬКА

У роботі наведено результати досліджень рівня хлорофілів та каротиноїдів у листках декоративних злаків (*Festuca ovina* L., *Miscanthus sinensis* Anderss) в степовій зоні України у відповідь на посушливі умови зростання. Встановлено, що вміст основних фотосинтетичних пігментів у *F. ovina* і *M. sinensis* видоспецифічно змінювався протягом сезону, залежно від фази вегетації і погодних умов. Недостатній рівень зволоження суттєвіше впливав на кількість пігментів у листках обох видів, що підтверджується високими кореляційними коефіцієнтами, а сила зв'язку з часом міцнішала. Показано, що на початкових етапах онтогенезу концентрації хлорофілів *a* і *b* та загальних каротиноїдів у досліджуваних декоративних злаків були практично однаковими. Хоча *F. ovina* вважається досить посухостійкою рослиною, вона гостріше реагувала на довготривалу дію посухи протягом вегетаційного періоду, порівняно з *M. sinensis*, про що свідчило поступове відчутне зниження в її листках вмісту хлорофілів (від 1,3 раза у фазу масового цвітіння до 2,5 раза наприкінці вегетації) та каротиноїдів (у 1,1 та 1,3 раза менше, відносно початку вегетації), які витрачалися на нівелювання негативних наслідків від стресового впливу. У результаті, майже вдвічі знижувалося співвідношення хлорофіли/каротиноїди і порушувалася збалансованість між кількістю поглинутої пігментами світлової енергії та ефективністю її використання у фотосинтетичних реакціях. У рослин *M. sinensis* високі температури та недостатність зволоження у фазу масового цвітіння індукували запуск захисних реакцій у клітинах: незначне зростання рівня хлорофілів *a* і *b* та збільшення у 1,12 раза співвідношення хлорофіли/каротиноїди. Тоді як тривала дія хронічної посухи аж до фази завершення вегетації (з червня по жовтень 2024 р.) у виду спричиняла зниження у 1,4 раза кількості хлорофілів та в 1,3 раза показника співвідношення хлорофілів до каротиноїдів. Встановлене показало, що адаптивні реакції основних фотосинтетичних пігментів у листках *M. sinensis* проявлялися залежно від тривалості стресової дії абіотичних факторів, аж до появи симптомів окиснювального стресу.

Ключові слова: *Miscanthus*, *Festuca*, хлорофіли, каротиноїди, посуха.

Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України, вул. Ботанічна, 50, м. Кривий Ріг, 50089, Україна; e-mail: zubrovska@ukr.net

Зубровська О.: <https://orcid.org/0000-0002-4173-2457>

Pigment content in the leaves of ornamental grasses in the steppe zone of Ukraine

Zubrovska O.

The article presents the results of studies of the level of chlorophylls and carotenoids in the leaves of ornamental grasses (*Festuca ovina* L., *Miscanthus sinensis* Anderss) in the steppe zone of Ukraine in response to arid growth conditions. It was found that the content of photosynthetic pigments in *F. ovina* and *M. sinensis* varied species-specifically throughout the season, depending on the vegetation phase and weather conditions. The amount of pigments in the leaves of both species was significantly affected by insufficient moisture levels. This is confirmed by high correlation coefficients, and the strength of the relationship increased over time. It has been shown that at the beginning of ontogenesis, the concentrations of chlorophylls *a* and *b*, as well as total carotenoids in the leaves of the studied ornamental grasses were similar. Compared to *M. sinensis*, *F. ovina* reacted more sharply to prolonged drought during the growing season. This was indicated by a significant decrease in the content of chlorophyll (from 1.3 times during the mass flowering phase and 2.5 times at the end of the growing season) and carotenoids (1.1 and 1.3 times less, relative to the beginning of the growing season) in its leaves, which were used to offset the negative effects of stress. As a result, the chlorophyll/carotenoid ratio was reduced by almost half, and the balance between the amount of light energy absorbed by pigments and its efficient use in photosynthetic reactions was disrupted. In *M. sinensis* plants, high temperatures and insufficient moisture during the mass flowering phase induced the onset of protective reactions in cells: a slight increase in chlorophyll *a* and *b* levels and a 1.12 times increase in the chlorophyll/carotenoid ratio. The prolonged effect of chronic drought until the end of the growing season (from June to October 2024) caused a 1.4 times decrease in chlorophyll content and a 1.3 times decrease in the chlorophyll/carotenoid ratio. The results showed that the adaptive responses of the main photosynthetic pigments in *M. sinensis* leaves depended on the duration of stress caused by abiotic factors, up to the appearance of oxidative stress symptoms.

Key words: *Miscanthus*, *Festuca*, chlorophylls, carotenoids, drought.

Kryvyi Rih Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine, St. Botanichna, 50, Kryvyi Rih, 50089, Ukraine; e-mail: zubrovska@ukr.net Zubrovska O.: <https://orcid.org/0000-0002-4173-2457>

Вступ

Використання в озелененні нових видів багаторічних трав'янистих рослин, особливо у так званих «природних садах», в умовах постійної зміни клімату та антропогенного впливу у великих містах має потенціал не лише для зменшення ефекту міського теплового острова чи очищення повітря, а й сприяє біорізноманіттю та покращенню довкілля. Проте, для введення у культуру природних видів необхідно вивчити їх адаптивну здатність до комбінованої дії стресорів. Тепло, забруднення середовища, коливання вологості ґрунту, недостатнє або надмірне освітлення місцезростання тощо разом негативно впливають на рослинність, посилюючи стресову дію один одного (Krzyzak et al. 2023; Mircea et al. 2023). Зростаюча частота та інтенсивність посушливих періодів у степовій зоні України є серйозною загрозою для довкілля. Саме тому впровадження стресостійких видів і сортів рослин стають все більш актуальними в усіх галузях садівництва, у тому числі й у квітникарстві. Попередньо проведені нами дослідження (Чуруляк et al. 2022; Zubrovska 2023; 2024) дозволяють стверджувати, що використання окремих видів декоративних злаків зможе розширити асортимент рослин для озеленення великих міст в умовах постійної зміни клімату.

Одним з головних стресорів, які обмежують ріст та розвиток рослин у міських насадженнях і викликають в них серію фізіологічних, морфологічних, біохімічних і молекулярних змін, вважається сумісна дія посухи й надмірних температур

(Ferrante et al. 2021). В останні десятиріччя значно збільшилося вивчення реакцій-відповідей квітниково-декоративних рослин на посуху та механізмів, які лежать в їх основі (Lima et al. 2022; Jędrzejuk et al. 2024). В першу чергу, у рослин зневоднюються клітини і посилено утворюються активні форми кисню, порушується дихання, транспірація, фотосинтез, синтез хлорофілу, знижується ріст і відбуваються зміни морфології (Karoor et al. 2020). Загальновідомо, що жоден з асиміляційних процесів у рослині неможливий без участі фотосинтетичних пігментів, а хлорофіл є одним з основних компонентів, задіяних у роботі фотосистем хлоропластів, від вмісту якого залежить швидкість фотосинтезу і продуктивність рослинного організму (Sharma et al. 2020). Загальна кількість хлорофілів у листках рослин є чутливим рослинним маркером на дію абіотичних стресорів (Karimpour 2019), а її зменшення у посушливих умовах зростання вважається типовим симптомом окиснювального стресу внаслідок деградації пігментів (Wach, Skowron 2022). Саме тому мета нашої роботи – дослідити сезонні зміни вмісту пігментів фотосинтезу у листках *Miscanthus sinensis* Anderss. і *Festuca ovina* L. в умовах степової зони України.

Матеріали та методи

Дослідження проводили протягом 2024 року – найбільш посушливого за останні 10 років (Meteopost 2025). Він відрізнявся досить складними метеорологічними умовами (Рис. 1): нестачею вологи у повітрі і ґрунті, аномально високими літніми (до $+38^{\circ}\text{C}$) та осінніми (до

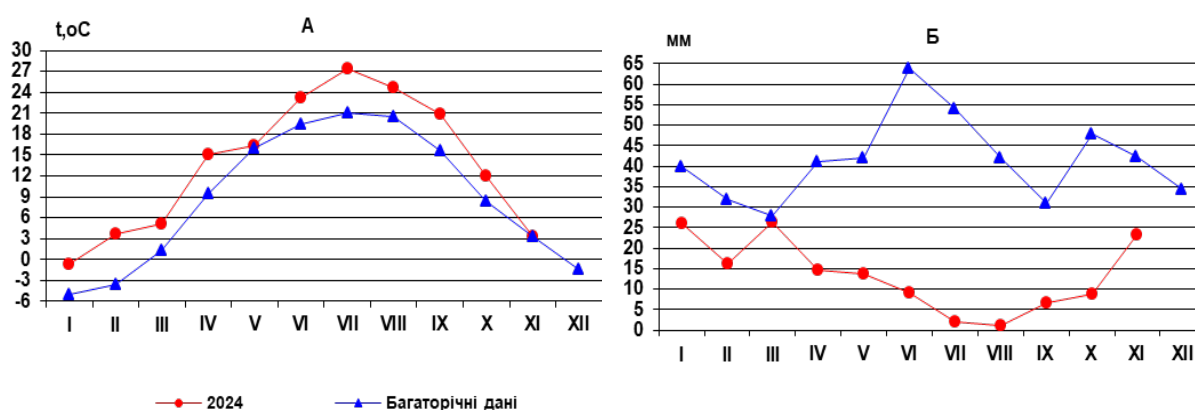


Рис. 1. Метеорологічні умови 2024 року (за даними метеостанції КБС НАН України): А – середньомісячна температура повітря, Б – середньомісячна сума опадів; багаторічні дані наведено згідно архіву погоди (Meteopost 2025).

Fig. 1. Meteorological conditions in 2024 (according to data from the KBS NAS of Ukraine weather station): A – average monthly air temperature, B – average monthly precipitation; long-term data are provided according to the weather archive (Meteopost 2025).

+33,2⁰С у вересні) температурами. Як наслідок, на життєздатність рослин впливала як атмосферна, так і ґрунтова посуха (сухість повітря, надмірні температури, сухості та сильне зменшення доступної для рослин гравітаційної вологи у ґрунті).

Об'єктами дослідження були *Miscanthus sinensis* Anderss. і *Festuca ovina* L. інтродуковані в Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України (КБС НАН України). Відбір рослинного матеріалу (листіків) здійснювали у фази початку весняного відростання (III декада травня), масового цвітіння (II декада червня і III декада серпня для *F. ovina* і *M. sinensis* відповідно) і завершення вегетації (I декада жовтня). На всіх етапах у листках обох видів визначали вміст хлорофілів та каротиноїдів згідно Wellburn (1994). Концентрації пігментів розраховували за наступними формулами:

$$C_a = 12,19 \times A_{665} - 3,45 \times A_{649}$$

$$C_b = 21,99 \times A_{649} - 5,32 \times A_{665}$$

$C_{кар} = (1000 \times A_{480} - 2,14 \times C_a - 70,16 \times C_b) / 200$, де C – концентрація пігментів, мг/г сирої речовини; A – оптична густина розчину при відповідній довжині хвилі.

Статистичну обробку даних і ступінь залежності досліджуваних параметрів (кореляцію) проводили за методами параметричної варіаційної статистики при 95% рівні значущості ($P \leq 0,05$) згідно Yehorshyn, Lisovyy (2005), використовуючи пакет програм Microsoft Office Excel.

Таблиця 1. Вміст пігментів у листках декоративних злаків протягом сезону в умовах Криворізького ботанічного саду Національної академії наук України (2024 р).

Table 1. Pigment content in the leaves of ornamental grasses throughout the season at the Kryvyi Rih Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine (2024).

Фаза розвитку	Вміст пігментів, мг/г сирої речовини								
	Chl a			Chl b			Car		
	M±m	% до контр.	T _{st}	M±m	% до контр.	T _{st}	M±m	% до контр.	T _{st}
<i>Miscanthus sinensis</i> Anderss.									
B	2,04±0,005	—	—	1,00±0,018	—	—	0,64±0,001	—	—
Ц _м	2,13±0,039	104,7	2,4	1,15±0,047	115,0	63,3	0,61±0,007	94,8	4,7
B ₂	1,46±0,018	71,5	31,0	0,68±0,014	68,0	89,7	0,59±0,008	91,3	6,9
<i>Festuca ovina</i> L.									
B	2,09±0,010	—	—	0,97±0,016	—	—	0,53±0,006	—	—
Ц _м	1,66±0,032	79,4	13,0	0,78±0,026	80,4	39,0	0,48±0,006	90,6	20,7
B ₂	0,90±0,006	43,2	102,6	0,33±0,004	34,0	43,3	0,40±0,003	75,5	38,3

Примітка: B – фаза весняного відростання (III декада травня); Ц_м – фаза масового цвітіння (II декада червня (*F. ovina*) та III декада серпня (*M. sinensis*)); B₂ – фаза завершення вегетації (I декада жовтня); розбіжності достовірні відносно контролю за критерієм Стьюдента при $c < 0,05$.

Note: B – spring regrowth phase (III decade of May); Ц_м – mass flowering phase (II decade of June (*F. ovina*) and III decade of August (*M. sinensis*)); B₂ – phase of vegetation termination (I decade of October); differences are significant according to Student's criterion at $c < 0.05$.

Результати

Вміст основних фотосинтетичних пігментів у листках досліджуваних декоративних злаків видоспецифічно змінювався протягом сезону, на що впливали як фаза їх онтогенезу, так і погодні умови. Відзначимо, що на початкових етапах вегетації концентрації хлорофілів *a* і *b* (Chl *a* і Chl *b*) та загальних каротиноїдів (Car) як у *M. sinensis*, так і у *F. ovina* були практично однаковими (Табл. 1). У фазу масового цвітіння у листках *M. sinensis* рівні Chl *a* і Chl *b* несуттєво зростали у 1,05 і 1,15 раза відповідно. Натомість, у рослин *F. ovina* концентрації обох форм хлорофілу навпаки знижувалися у 1,2-1,3 раза відносно весняних показників, причому, в більшій мірі скорочувався рівень Chl *a* (Табл. 1). Біосинтез каротиноїдів у *M. sinensis* і *F. ovina* на даному етапі вегетації пригнічувався на 5-10 %.

З подальшим сезонним розвитком у обох видів декоративних злаків стресова дія хронічної посухи посилювала процеси деградації фотосинтетичних пігментів. Так, у листках *M. sinensis* вміст хлорофілів знизився у 1,5 раза, а каротиноїдів – у 1,1 раза відносно початкових етапів морфогенезу (Табл. 1). Рослини *F. ovina* більш гостро реагували на нестачу вологи у ґрунті та екстремально високі температури восени (середньомісячний показник +20,9⁰С). Рівень хлорофілу *a* у виду скоротився у 2,3 раза, хлорофілу *b* – у 3 раза, а каро-

тиноїдів – у 1,3 раза, порівняно з фазою весняного відростання.

Важливим показником збалансованості фотосинтетичного процесу є співвідношення форм хлорофілу. Нашими дослідженнями показано, що у фазу масового цвітіння як у *M. sinensis*, так і у *F. ovina* співвідношення хлорофілу *a* до хлорофілу *b* (Chl *a*/Chl *b*) знижувалося у 1,05-1,10 раза відносно початку сезонного розвитку (рис. 2), і коливалося у межах 1,85-2,1. Тоді як наприкінці онтогенезу цей показник, порівняно з попередніми етапами дослідження, зростав: у 1,06 раза для рослин *M. sinensis* та в 1,3 раза для *F. ovina*, що вказує на зменшення у загальному вмісті хлорофілів частки хлорофілу *b*.

Співвідношення хлорофіли/каротиноїди (У Chl/У Car) вважають показником збалансованості між кількістю поглинутої пігментами світлової енергії та ефективністю її використання

у фотосинтетичних реакціях, а зменшення цього співвідношення за дії стресору вказує на порушення такого балансу (Hric et al. 2018). Так, у листках *M. sinensis* у фазу масового цвітіння індекс У Chl/У Car зростав у 1,13 раза відносно весняних показників (див. рис. 2). Натомість, тривала дія хронічної посухи аж до завершення вегетації (максимальні температури восени сягали +33,2°C, а сума опадів не перевищувала 8,8 мм) спричиняла зниження даного індексу у 1,3 раза. У рослин *F. ovina* вже на етапі масового цвітіння співвідношення У Chl/У Car зменшувалося у 1,2 раза, а у період завершення вегетації – майже вдвічі.

Для визначення сили впливу екологічних чинників середовища, в якому проходить розвиток рослина, був проведений корелятивний аналіз залежності вмісту фотосинтетичних пігментів у листках декоративних злаків від кількості опадів та температури повітря (Табл. 2,

Таблиця 2. Дані кореляційного аналізу між сумою опадів і вмістом пігментів у листках окремих видів декоративних злаків (2024 р.)

Table 2. Correlation analysis data between precipitation and pigment content in the leaves of ornamental grass species (2024)

Етап дослідження (сума опадів/міс.)	Хл а	Хл b	Сума каротиноїдів
	r±m _r	r±m _r	r±m _r
<i>Miskantus sinensis</i> Anderss.			
III декада травня (13,6 мм)	0,83*±0,11	0,78*±0,12	0,99*±0,02
III декада серпня (1,2 мм)	0,82*±0,12	0,74*±0,13	0,72*±0,14
I декада жовтня (8,8 мм)	0,97*±0,05	0,83*±0,11	0,91*±0,09
<i>Festuca ovina</i> L.			
III декада травня (13,6 мм)	0,46*±0,18	0,35*±0,13	0,37*±0,15
II декада червня (9,0 мм)	0,73*±0,14	0,80*±0,12	0,76*±0,19
I декада жовтня (8,8 мм)	1,00*±0,02	0,85*±0,11	0,98*±0,04

Примітка: тут і в табл. 3 r – кореляційний коефіцієнт: r >= ±0,3 – сила зв'язку слабка, r = (0,5-0,6) – середня, r >= 0,7 – сильна; * – розбіжності достовірні відносно контролю за критерієм Стьюдента при c<0,05.

Note: here and Table 3, r – correlation coefficient: r >= ±0.3 – weak correlation, r = (0.5-0.6) – medium correlation, r >= 0.7 – high correlation; * – differences are significant according to Student's criterion at c<0.05.

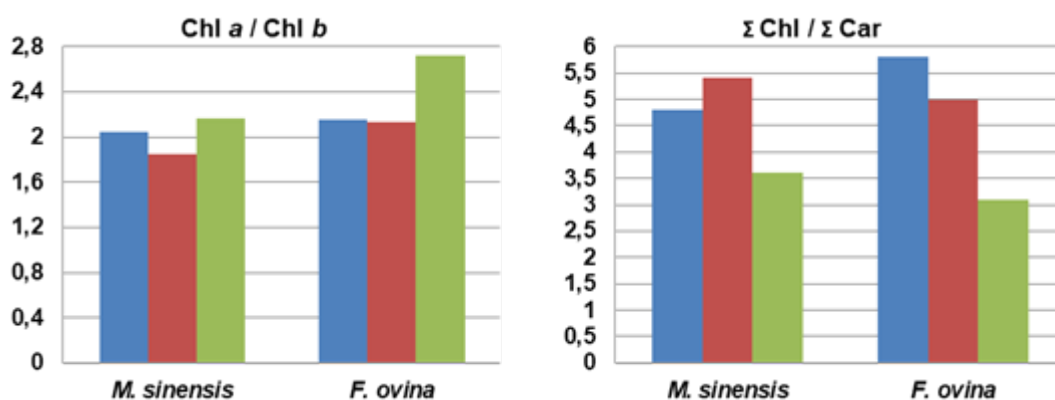


Рис. 2. Співвідношення різних форм пігментів у листках декоративних злаків протягом їх сезонного розвитку в Криворізькому ботанічному саду Національної академії наук України (2024 р.): В – фаза весняного відростання (III декада травня); Ц_м – фаза масового цвітіння (II декада червня (*F. ovina*) та III декада серпня (*M. sinensis*)); В₂ – фаза завершення вегетації (I декада жовтня).

Fig. 2. Ratio of different pigment forms in the leaves of ornamental grasses during their seasonal development in the Kryvyi Rih Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Ukraine (2024): В – spring regrowth phase (III decade of May); Ц_м – mass flowering phase (II decade of June (*F. ovina*) and III decade of August (*M. sinensis*)); В₂ – phase of vegetation termination (I decade of October).

Таблиця 3. Дані кореляційного аналізу між температурою повітря і пігментами у листках окремих видів декоративних злаків (2024 р.).

Table 3. Correlation analysis data between air temperature and pigments in the leaves of ornamental grass species (2024).

Етап дослідження (середньомісячна t°C)	Хл а	Хл b	Сума каротиноїдів
	r±m _r	r±m _r	r±m _r
<i>Miskantus sinensis</i> Anderss.			
III декада травня (+16,4°C)	0,83*±0,11	0,63*±0,10	0,40*±0,18
III декада серпня (+24,6°C)	-0,83*±0,11	-0,93*±0,07	-0,99*±0,02
I декада жовтня (+20,9°C)	-0,56*±0,10	-0,58*±0,16	-0,57*±0,09
<i>Festuca ovina</i> L.			
III декада травня (+16,4°C)	0,72*±0,14	0,98*±0,04	0,30*±0,09
II декада червня (+23,2°C)	-0,48*±0,18	-0,62*±0,16	-0,40*±0,08
I декада жовтня (+20,9°C)	-0,43*±0,18	-0,50*±0,15	-0,45*±0,18

3). Отримані результати свідчили про наявність як прямої (опадів), так і оберненої (температура) кореляційної залежності між кліматичними умовами та рівнем хлорофілів і загальних каротиноїдів. Причому, в більшій мірі на кількість пігментів фотосинтезу у листка обох видів злаків протягом сезону впливав недостатній рівень зволоження, а сила зв'язку міцнішала з часом, що підтверджується високими кореляційними коефіцієнтами від $r=0,7$ до $r=1,00$. Тобто, чим меншою була сума опадів у відповідний етап онтогенетичного розвитку, тим нижчий вміст пігментів фіксувався в асиміляційних органах як *M. sinensis*, так і *F. ovina*.

Високі температури також досить сильно впливали на рівень хлорофілів і каротиноїдів у листках досліджуваних видів, проте сила кореляційного зв'язку була слабшою, порівняно з такою для зволоження (Табл. 3).

Відмітимо, що у рослин *M. sinensis* ступінь сполученості пігментів (особливо хлорофілу *b* і каротиноїдів) із температурним фактором протягом сезону в умовах КБС НАН України був достатньо високий ($r = -0,83 - -0,99$) і з часом дещо знижувався ($r = -0,56 - -0,58$). Тоді як для *F. ovina*, практично на всіх етапах онтогенезу сила кореляційного зв'язку між температурою повітря і пігментами у листках була слабкою або середньою ($r = -0,40 - -0,62$).

Обговорення

В екстремальних умовах зростання адаптивні стратегії рослин, першочергово, пов'язані з модифікаціями фотосинтетичних структур, які регулюють водний статус і фізіологічні функції зменшення провідності продихів, листової поверхні, кількісними і якісними змінами основних фотосинтетичних пігментів тощо (Hatfield et al. 2011; Sharma et al. 2020). Завдяки таким механізмам рослини більшості злаків адаптуються до дефі-

циту вологи, наприклад, згортаючи листки вздовж так, щоб продиховий їх бік опинявся всередині трубки (Giordano et al. 2021). Асиміляційна діяльність рослин є первинним метаболічним процесом і, безумовно, вміст і стан пігментів визначає не лише розвиток і активність фотосинтезу, але й протікання інших ферментативних реакцій, тобто характеризує продуктивність, життєздатність і стійкість рослин. Вивчення особливостей змін вмісту основних фотосинтетичних пігментів у листках рослин з різною толерантністю має велике значення для з'ясування механізмів пристосування до умов існування.

Так, встановлене нами незначне зростання рівнів обох форм хлорофілу у рослин *M. sinensis* у фазу масового цвітіння властиве для більшості рослин, так як саме на цьому етапі розвитку кількість фотосинтетичних пігментів у листках зазвичай збільшується (Al Hassan et al. 2022). Проте, ми вважаємо, що підтримка рослиною вмісту хлорофілів на постійному рівні може вказувати на прояв посухостійкості, адже цвітіння виду припало на посушливий період (максимальні температури повітря сягали +36,4°C, а середньомісячна сума опадів не перевищувала 1,2 мм). Зауважимо, що міскантуси мають високий адаптивний потенціал, насамперед через їх здатність до C_4 фотосинтезу та низький вміст лігніну в клітинній стінці (Malinowska et al. 2020).

На відміну від попереднього виду, зниження концентрації обох хлорофілів у листках *F. ovina* під час цвітіння, вочевидь, обумовлено їх деградацією внаслідок окиснювального стресу, викликаного посушливими погодними умовами. Зменшення вмісту хлорофілу *a*, можна пояснити інгібуванням кількох етапів утворення порфірину та скороченням кількості пігмент-зв'язуючих білків (Abdelkader et al. 2007). Тоді як зниження рівня хлорофілу *b*, ймовірно, пов'язано зі зменшенням

кількості та розмірів світлозбираючих комплексів, до яких він входить, як було показано у рослин роду *Carlina* L. за дії високих температур та надлишку інсоляції (Kravets et al. 2019). Така реакція *F. ovina* на високі температури повітря та нестачу вологи у ґрунті, зумовлюється неглибокою кореневою системою.

Довготривалі посушливі умови зростання до кінця вегетаційного сезону у обох видів декоративних злаків пригнічували біосинтез пігментів та посилювали їх деградацію. А оскільки концентрація хлорофілів вважається основним визначальним фактором фотосинтетичної здатності (Kedruk et al. 2024), встановлене нами зниження вмісту хлорофілів *a* і *b* у листках *M. sinensis* можна оцінити як захисну роль цих пігментів у запобіганні фотоінгібуванню та фотопошкодженню, а також у покращенні ефективності фотосистеми II. Схожа тенденція для рослин виду показана у роботі Jańczak-Pieniżek (2024) в умовах засолення ґрунтів. Натомість, значне зниження рівня хлорофілів у *F. ovina* внаслідок тривалої дії хронічної посухи, вочевидь, відбувалося внаслідок порушення механізму нефотохімічного гасіння хлорофілу (Kumari et al. 2021) і пошкодження фотосинтетичного апарату активними формами кисню. Тобто, рослини виду були значно пригнічені і не могли підтримувати ефективність фотосинтезу на оптимальному рівні.

Важливу роль у фотосинтезі рослин відіграють і каротиноїди, які не лише постачають додаткову світлову енергію до реакційних центрів фотосистем I і II, але й захищають хлорофіли від деструктивної дії світла і кисню (Lima et al. 2022). У більшості випадків каротиноїди менш чутливі до водного стресу, ніж хлорофіли (Ferrante et al. 2021), проте експериментами Rositska (2011) показано інгібуючий вплив водного дефіциту на біосинтез каротиноїдів, що узгоджується з отриманими нами даними для рослин *M. sinensis* і *F. ovina*. Очевидно, що використання каротиноїдів у захисті фотосистем досліджуваних видів у посушливих умовах інтродукції переважало над їх синтезом у клітинах. Однак, можливо, такі зміни вмісту навпаки вказують на акліматизацію рослин в стресових умовах, як зазначають D.P. Lima зі співавторами (2022).

Хлорофіл *a* пов'язаний з реакційними центрами фотосистеми I, а хлорофіл *b* – зі світлозбираючим комплексом фотосистеми II (Stasik et al. 2021). Їх співвідношення відповідає за оптимальне функціонування процесів фотосинтезу і адаптаційну спроможність рослинного організму до факторів довкілля. Зазвичай посуховий стрес призводить до зменшення частки хло-

рофілу *a*, але збільшує кількість хлорофілу *b*, а зниження співвідношення хлорофілів першочергово відбувається у чутливих до дефіциту вологи видів (Karimpour 2019). Встановлене нами зростання Chl *a*/Chl *b*, вочевидь, є адаптаційною реакцією на стресові умови в середовищі зростання та свідчить про посухостійкість обох видів злаків, і добре узгоджується з даними інших дослідників (Kumari et al. 2021, Al Hassan et al 2022).

Відомо, що чим меншим є співвідношення хлорофілів до каротиноїдів, тим у більш стресових умовах перебуває рослина, адже вміст каротиноїдів знаходиться у прямій кореляційній залежності від гормону стресу (Kravets et al. 2019). Індекси Y_{Chl}/Y_{Car} у досліджуваних видів свідчили, що температурний фактор та недостатність зволоження у фазу масового цвітіння призводили до запуску захисних реакцій у листках *M. sinensis*, за рахунок зміщення рівноваги у бік інтенсивнішого синтезу хлорофілів. Однак, тривала дія посухи аж до завершення сезонного розвитку у даного виду спричиняла посилення фотоокиснення і деградацію хлорофілів *a* і *b*. Посушливі умови зростання 2024 року в КБС НАН України для рослин *F. ovina* виявилися більш екстремальними, ніж для *M. sinensis*. Схоже, що за дефіциту вологи *F. ovina* не могла підтримувати ефективне функціонування фотосинтетичних пігментів, що, насамперед, залежало від значного порушення механізму нефотохімічного гасіння хлорофілу внаслідок дії активних форм кисню і відображалося у зниженні показників Y_{Chl}/Y_{Car} .

Висновки

Отже, залежно від погодних умов протягом сезону та фази онтогенезу в умовах інтродукції нами встановлено видоспецифічні зміни вмісту основних фотосинтетичних пігментів у листках *M. sinensis* та *F. ovina*. У фазу весняного відростання (кінець травня) сума хлорофілів досягала 3,06 мг/г сирової речовини. З подальшим сезонним розвитком обох видів стресова дія хронічної посухи посилювала процеси деградації пігментів: відносно початкових етапів морфогенезу у листках *M. sinensis* сума хлорофілів під час цвітіння збільшувалася у 1,07 раза, наприкінці вегетації зменшувалася у 1,4 раза, тоді як у *F. ovina* сума хлорофілів у відповідні фази розвитку зменшувалася у 1,3 та 2,5 раза. Як у *M. sinensis*, так і *F. ovina* співвідношення Chl *a*/Chl *b* до завершення вегетаційного сезону зростало в 1,06-1,3 раза та свідчило про зменшення у загальному вмісті частки

хлорофілу *b*. Встановлено, що співвідношення У Chl/У Car наприкінці сезонного розвитку у листках *M. sinensis* знижувалося в 1,3 рази, тоді як у *F. ovina* – майже вдвічі, тобто відбувалося збільшення частки захисних пігментів – каротиноїдів.

Протягом вегетації *F. ovina* і *M. sinensis* виявляли різні рівні й напрямок кореляційної залежності вмісту хлорофілів і каротиноїдів від суми опадів та температури повітря. Для обох видів визначено пряму міцну кореляцію між сумою опадів та вмістом пігментів ($r = +0,7 - +1,0$). Температура повітря у травні позитивно корелю-

вала з вмістом зелених пігментів у злакових рослин, але за посилення посухи у *M. sinensis* визначена міцна обернена кореляція ($r =$ від $-0,83$ до $-0,99$), а у *F. ovina* – обернена слабка або середня ($r =$ від $-0,40$ до $-0,62$).

Отримані результати впливу сезонних кліматичних умов на пігментний фонд у листках декоративних злаків свідчать про широкі адаптаційні можливості фотосинтетичного апарату видів та підтверджують різну чутливість прихованих і видимих ознак порушень до негативного впливу чинників довкілля.

- ABDELKADER, A.F., ARONSSON, H., SUNDQVIST, C. (2007) High salt stress in wheat leaves causes retardation of chlorophyll accumulation due to a limited rate of protochlorophyllide formation. *Physiology Plant*, 130, 157–166.
- AL HASSAN, M., VAN DER CRUIJSEN, K., DEES, D., DOLSTRA, O., TRINDADE, L.M. (2022) Investigating applied drought in *Miscanthus sinensis*; sensitivity, response mechanisms, and subsequent recovery. *GCB Bioenergy*, 4, 756–775. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12941>
- CHYPYLYAK, T.F., ZUBROVSKA, O.M., SHOL, H.N. (2022) *Roslyny v urbotekhnohennomu seredovyshchi stepovoyi zony Ukrainy* [Plants in the urban-technogenic environment of the steppe zone of Ukraine]. Talcom, Kyiv (in Ukrainian).
- FERRANTE, A., TOSCANO, S., ROMANO, D., VAGGE, I. (2021) Physiological and morpho-anatomical traits used as markers for the selection of drought tolerance of ornamental plants. *Acta Horticulturae*, 1331, 253–260. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1331.34>
- GIORDANO, M., PETROPOULOS, S.A., CIRILLO, C., ROUPHAELY. (2021) Biochemical, Physiological, and Molecular Aspects of Ornamental Plants Adaptation to Deficit Irrigation. *Horticulturae*, 7, 107. <https://doi.org/10.3390/horticulturae 7050107>
- HATFIELD, J.L., BOOTE, K.J., KIMBALL, B.A., ZISKA, L.H., IZAURRALDE, R.C., ORT, D., THOMSON, A.M., WOLFE, D. (2011) Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103, 351–370. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>
- HRIC, P., VOZÁR, L., KOVÁR, P. (2018) The changes of the assimilation pigments content of turf *Festuca* spp. leaves after application of different nutrition forms. *Acta fytootechnica et Zootechnica*, 21(1), 6–10. <https://doi.org/10.15414/afz.2018.21.01.06-10>
- JAŃCZAK-PIENIAŻEK, M., PIKULA, W., PAWLAK, R., DRYGAŚ, B., SZPUNAR-KROK, E. (2024) Physiological Response of *Miscanthus sinensis* (Anderss.) to Biostimulants. *Agriculture*, 14, 33. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010033>
- JĘDRZEJUK, A., CHYLICKI, F., FORMALPIENIAK, B. (2024) *Festuca ovina* L. as a Monitor Plant Species of Traffic Air Along the Highway in of the City of Warsaw (Poland). *Agriculture*, 14, 1750. <https://doi.org/10.3390/agriculture14101750>
- KAPOOR, D., BHARDWAJ, S., LANDI, M., SHARMA, A., RAMAKRISHNAN, M., SHARMA, A. (2020) The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. *Applied Sciences*, 10(16), 5692. <https://doi.org/10.3390/app10165692>
- KARIMPOUR, M. (2019) Effect of drought stress on RWC and chlorophyll content on wheat (*Triticum durum* L.) genotypes. *World Essays Journal*, 7, 52–56.
- KEDRUK, A.S., KIRIZIY, D.A., STASIK, O.O., SOKOLOVSKA-SERGIENKO, O.G., TARASIUK, M.V. (2024) Effects of drought on photosynthetic induction in leaves of different wheat genotypes under dark-to-light transition. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 15(3), 504–513. <https://doi.org/10.15421/022471>
- KRAVETS, N.B., HRYTSAK, L.R., PROKOP'YAK, M.Z., MAYOROVA, O.Yu., DROBYK, N.M. (2019) Vmist fotosyntetychnykh pihmentiv u roslynakh rodu *Carlina* L. u pryrodi ta kulturi *in vitro* [The content of photosynthetic pigments in *Carlina* L. plants in nature and *in vitro* culture]. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*, 4(78), 16–23. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.25128/2078-2357.19.4.3>
- KRZYŻAK, J., RUSINOWSKI, S., SITKO, K., SZADABORZYSZKOWSKA, A., BORGULAT, J., STEC, R., HANSLIN, H.M., POGRZEBA, M. (2023) The Effect of Combined Drought and Temperature Stress on the Physiological Status of Calcareous Grassland Species as Potential Candidates for Urban Green Infrastructure. *Plants*, 12, 2003. <https://doi.org/10.3390/plants12102003>
- KUMARI, A., SOOD, V.K., ARORA, A. (2021) Effect of drought stress on physio-biochemical

- parameters in *Festuca* and *Lolium* genotypes. *Annals of Phytomedicine*, 10(2), 494–501. <https://doi.org/10.21276/ap.2021.10.2.65>
- LIMA, D. de P., DELLA TORRE, F., CORDEIRO, B. R., SCOTTI, M. R., FRANÇA, M. G. C. (2022) Shade induces contrasting light photosynthetic performance between Signal and Guinea Grasses. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 44, e53561. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.53561>
- MALINOWSKA, M., DONNISON, I., ROBSON, P. (2020) Morphological and physiological traits that explain yield response to drought stress in *Miscanthus*. *Agronomy*, 10, 1194. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081194>
- METEOPOST. Weather archive: Kryvyi Rih airport (2025) Available from: <https://meteopost.com/weather/archive/> (accessed 27.07.2025).
- MIRCEA, D.M., CALONE, R., SHAKYA, R., ZUZUNAGAROSAS, J., SESTRAS, R.E., BOSCAIU, M., SESTRAS, A.F., VICENTE, O. (2023) Evaluation of Drought Responses in Two *Tropaeolum* Species Used in Landscaping through Morphological and Biochemical Markers. *Life*, 13, 960. <https://doi.org/10.3390/life13040960>
- ROSITSKA, N.V. (2011) Fiziolohe-biokhimichni aspekty formuvannya stiykosti *Pinus sylvestris* L. do diyi posukhy [Physiological and biochemical aspects of the formation of resistance of *Pinus sylvestris* L. to drought]. *Scientific Issue Ternopil National Pedagogical University. Series: Biology*, 2(47), 112–115. (in Ukrainian)
- SHARMA, A., KUMAR, V., SHAHZAD, B., RAMAKRISHNAN, M., SIDHU, G.P.S., BALI, A.S., HANDA, N., KAPOOR, D., YADAV, P., KHANNA, K., BAKSHI, P., REHMAN, A., KOHLI, S.K., KHAN, E.A., PARIHAR, R.D., YUAN, H., THUKRAL, A.K., BHARDWAJ, R., ZHENG, B. (2020) Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(2), 509–531. <https://doi.org/10.1007/s00344-019-10018-x>
- STASIK, O.O., KIRIZIY, D.A., PRIADKINA, G.O. (2021) Fotosynteza i produktyvnist': osnovni naukovi dosyahnennya ta innovatsiyni rozrobky [Photosynthesis and productivity: main scientific achievements and innovative developments]. *Fiziolohiya roslyn i henetyka*, 53(2), 160–184. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.15407/frg2021.02.160>
- WACH, D., SKOWRON, P. (2022) An overview of plant responses to the drought stress at morphological, physiological and biochemical levels. *Polish Journal of Agronomy*, 50, 25–34. <https://doi.org/10.26114/pja.iung.435.2022.04>
- WELLBURN, A.R. (1994) The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *Journal Plant Physiology*, 144, 307–313.
- YEHORSHYN, O.O., LISOVYY, M.V. (2005). *Matematychni planuvannya pol'ovykh doslidiv ta statystychna obrobka eksperymental'nykh danykh*. Vydavnytvo Instytutu hruntoznavstva ta ahrokhimiyi im. O.N. Sokolovskoho, Kharkiv. (in Ukrainian)
- ZUBROVSKA, O.M. (2023) Introduktsiya dekoratyvnykh zlakiv u stepoviy zoni Ukrayiny ta perspektyvy yikh vykorystannya v mis'komu ozelenenni [Introduction of ornamental grasses in the Steppe of Ukraine and perspectives of using them in urban landscaping]. *Ecologic sciences*, 5(50), 127–133. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.18>
- ZUBROVSKA, O.M. (2024) Minlyvist' morfolohichnykh oznak vehetatyvnykh orhaniv vydiv rodiv *Festuca* L., *Miscanthus* Anderss. pry introduktsiyi v stepovu zonu Ukrayiny [Variability of morphological characteristics of vegetative organs of species of the genera *Festuca* L., *Miscanthus* Anderss. during introduction into the steppe zone of Ukraine]. *Acta Biologica Ukrainica*, 1, 5–12. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2024-1-01>

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026