

<https://doi.org/10.15407/frg2024.02.166>

УДК [581.132+581.5]:582.998.1

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ НА ВМІСТ ТА СПІВВІДНОШЕННЯ ФОТОСИНТЕТИЧНИХ ПІГМЕНТІВ У РОСЛИН РОДУ *CARLINA* L.

Х.М. КОЛІСНИК, Л.Р. ГРИЦАК, Н.М. ДРОБИК

Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка
47027 Тернопіль, вул. М. Кривоноса, 2
kolisnyk@chem-bio.com.ua

Фітобіота є індикатором стану навколишнього середовища, оскільки вплив різних абіотичних стресорів на рослини спричинює низку фізіолого-біохімічних змін у фотосинтетичному апараті. Рідкісні види рослин мають нижчий коефіцієнт виживання, ніж поширеніші види, їм також притаманна більша чутливість до зміни клімату. Досліджено вміст і співвідношення фотосинтетичних пігментів у рослин різних вікових груп видів роду *Carlina* L. у природних умовах зростання. Виявлено, що відмінності у екотопах росту позначилися на вмісті фотосинтетичних пігментів та їх співвідношеннях. Концентрація хлорофілів у фотосинтетичному апараті залежить від стадії онтогенезу, світлового, водного і температурного режимів. У виду *C. onopordifolia* Besser ex Szafer, Kulcz. et Pawl., що належить до світлолюбних рослин, загальний вміст пігментів вищий на 24—39 % порівняно із тіньовитривалим видом *C. cirsioides* Klokov. Аналіз динаміки вмісту пігментів упродовж 2017—2023 рр. показав, що фотосинтетичний апарат обох видів динамічно реагував на зміну абіотичних умов. Загальною закономірністю для рослин *C. onopordifolia* були істотні зміни по роках вмісту хлорофілу *a* і каротиноїдів у рослинах усіх вікових груп. З'ясовано, що концентрація пігментів у рослин генеративної групи *C. onopordifolia* є нижчою, порівняно із прегенеративними рослинами. У рослин *C. cirsioides*, які знаходяться на генеративній стадії життєвого циклу, навпаки, загальний вміст пігментів вищий порівняно із рослинами прегенеративної групи. Проведено кореляційний аналіз між вмістом фотосинтетичних пігментів рослин видів роду *Carlina* та метеокліматичними чинниками. Кореляційний аналіз показав, що між вмістом пігментів, їхніми співвідношеннями у досліджених видів роду *Carlina* та метеопараметрами середовища існують кореляційні зв'язки. Сила та напрям цих зв'язків змінювалися залежно від років дослідження. З'ясовано, що стан пігментного комплексу рослин як *C. onopordifolia*, так і *C. cirsioides*, більшою мірою залежить від дефіциту або надлишку води, ніж від температури повітря.

Ключові слова: *Carlina* L., рідкісні види, фотосинтетичні пігменти, метеочинники, кореляційний аналіз.

Рідкісні види рослин вважають індикаторами стану довкілля, оскільки вони мають низьку екологічну толерантність до коливання бага-

Цитування: Колісник Х.М., Грицак Л.Р., Дробик Н.М. Вплив кліматичних умов на вміст та співвідношення фотосинтетичних пігментів у рослин роду *Carlina* L. *Фізіологія рослин і генетика*. 2024. 56, № 2. С. 166—177.
<https://doi.org/10.15407/frg2024.02.166>

тьох абіотичних чинників, а також чутливіші до зміни клімату [1–5]. Підвищення глобальної середньої температури на 1–2 °C разом зі зміною середньої кількості опадів і збільшенням частоти екстремальних подій, таких як посухи, безпосередньо впливають на рослини і змінюють абіотичні та біотичні умови зростання. Ця проблема є актуальною і для території України. Зокрема, кліматологи встановили, що починаючи із 1991 р., кожне наступне десятиріччя в Україні було теплішим від попереднього: 1991–2000 рр. — на 0,5 °C, 2001–2010 — на 1,2 °C, 2011–2019 — на 1,7 °C [6, 7].

Відомо, що найчутливіший до дії чинників навколишнього середовища фотосинтетичний апарат (ФСА) [2, 8]. Тому маркерною ознакою, за якою можна оцінити вплив теплових хвиль на рослини, а також адаптивний потенціал видів, є вміст і співвідношення фотосинтетичних пігментів [9, 10]. Це пов'язано з тим, що тепловий стрес пригнічує біосинтез хлорофілу, впливає на асиміляцію CO₂, ультраструктуру хлоропластів, транспорт електронів і фотохімічні реакції [1]. Рідкісні види, які вже перебувають під загрозою зникнення, можуть бути особливо вразливими до зміни клімату, й інформація про те, як вони реагують на зміни клімату, має вирішальне значення для цілеспрямованих зусиль щодо збереження популяцій [1, 11, 12].

З огляду на викладене, метою роботи було визначення вмісту та співвідношення пігментів у різних вікових груп рослин *C. onopordifolia* Besser ex Szafer, Kulcz. et Pawt., *C. cirsioides* Klokov, а також залежності цих параметрів від метеорологічних умов місцезростання.

Методика

Матеріал для досліджень було відібрано під час експедиційних досліджень співробітниками лабораторії екології та біотехнології Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка у 2017–2018 рр., 2021 р. та 2023 р. біля с. Гутисько Бережанського р-ну, Тернопільської обл., на горі Голиця (295 м н.р.м, координати: 49°23'47" пн.ш; 24°49'54" сх.д.).

Для визначення залежності вмісту фотосинтетичних пігментів від зміни кліматичних чинників використано метеорологічні дані центру з гідрометеорології Державної служби з надзвичайних ситуацій за травень–серпень 2017–2018 рр., 2021 р., 2023 р. З метою мінімального пошкодження рослин матеріал відбирали за допомогою пробійного свердла із середньої частини листка. Вміст пігментів визначали у період цвітіння не менш, ніж у 5 іматурних, віргінільних та генеративних рослинах кожного виду у листках 2–3 ярусу вузлів розетки.

Вміст фотосинтетичних пігментів хлорофілів (Chl) *a* та *b* і загальних каротиноїдів визначали безмацераційною екстракцією пігментів диметилсульфоксидом із висічок певної площі у фазу цвітіння та на 7, 14 та 21-у доби після цієї фази. Оптичну густину отриманих розчинів визначали на спектрофотометрі за довжини хвиль 480, 649 та 665 нм. Концентрацію пігментів обчислювали за формулами Wellburn [13] з урахуванням об'єму витяжки, розведень розчинів і маси наважки.

Для вивчення взаємозв'язків між вмістом пігментів у рослинах *in situ* та метеочинниками проводили кореляційний аналіз з обрахуванням коефіцієнта кореляції Пірсона. Визначали напрям кореляційного зв'язку: прямий або зворотний і силу зв'язку. За аналізу вибіркового коефіцієнта кореляції (r) силу зв'язку оцінювали за шкалою Чеддока: при $r = 0$ — зв'язок відсутній; при $r =$ від 0,1 до 0,3 — слабкий зв'язок; 0,3—0,5 — зв'язок помірної сили; 0,5—0,7 — помітний зв'язок; 0,7—0,9 — зв'язок високої сили, 0,9—1 — зв'язок дуже високої сили.

Статистичний аналіз отриманих даних проводили за допомогою програмного забезпечення Prism 6. У таблицях і на рисунку наведено середньоарифметичні значення та їх стандартні похибки. Для статистичного аналізу фізіологічних параметрів рослин *in situ* використовували однофакторний дисперсійний аналіз ANOVA. Критичний рівень значущості за перевірки статистичних гіпотез у дослідженні вважали рівним 0,05.

Результати та обговорення

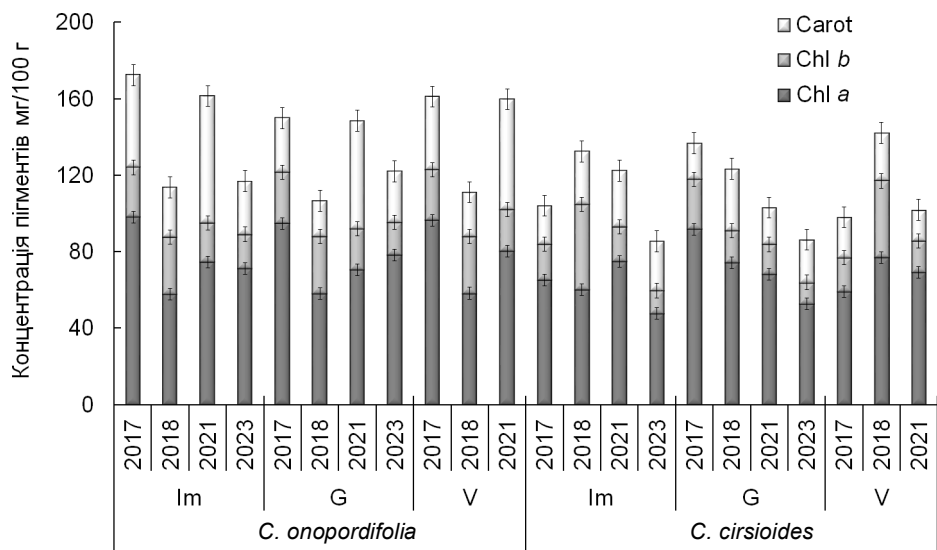
Вміст фотосинтетичних пігментів у листках рослин є одним із критеріїв-маркерів, за яким оцінюють стан ФСА. Концентрація хлорофілів у листках залежить від етапів життєвого циклу, умов росту, зокрема світлового, температурного і водного режимів [14]. Тому за вмістом пігментів можна визначити екологічну пластичність рослин та їхню здатність до виживання у змінених умовах середовища [15, 16].

Аналіз змін вмісту пігментів залежно від етапів життєвого циклу показав, що у рослин прегенеративної групи *C. onopordifolia* загальний вміст пігментів більше варіює порівняно із генеративними рослинами. Аналіз даних, представлених на рисунку, показує, що у рослин іматурної групи загальний вміст змінюється від 113,7 мг/100 г у 2018 р. до 172,38 мг/100 г у 2017 р. У віргінільних рослин вміст пігментів дещо нижчий порівняно із іматурними особинами, і коливається від 111,06 мг/100 г у 2018 р. до 161,13 мг/100 г у 2017 р. У рослин генеративної групи цей показник варіює від 106,62 мг/100 г у 2018 р. до 149,9 мг/100 г у 2017 р. Однак загальною закономірністю є найістотніші зміни по роках вмісту хлорофілу *a* і каротиноїдів у рослинах усіх вікових груп цього виду (див. рисунок).

Вміст фотосинтетичних пігментів у рослинах *C. cirsioides* нижчий на 24—39 % порівняно із *C. onopordifolia*. Крім того, найвищий загальний вміст пігментів здебільшого притаманний рослинам генеративної групи. Вміст каротиноїдів у рослин усіх вікових груп *C. cirsioides* у 1,1—2,4 раза менший порівняно із *C. onopordifolia* (див. рисунок).

Такі відмінності є відображенням еволюційного пристосування видів до місцезростань із різними світловими умовами. Збільшення частки каротиноїдів у загальному складі пігментів відбувається у несприятливих умовах, оскільки вони зв'язують пероксидні сполуки і захищають пігмент-білкові комплекси фотосинтетичних мембран від фотоокиснення. *C. onopordifolia* належить до світлолюбних видів, що пояснює високий вміст каротиноїдів у їхніх листках.

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ



Вміст фотосинтетичних пігментів у рослинах *C. cirsioides* та *C. onopordifolia* за природних умов росту у 2017, 2018, 2021 та 2023 рр.

Chl a — хлорофіл a; Chl b — хлорофіл b; Carot — сума каротиноїдів; Im — іматурні рослини; V — віргінійські рослини, G — генеративні рослини

Вміст пігментів у рослинах динамічно реагує на зміну умов середовища. У 2018 р. у рослин обох видів фактично усіх вікових груп, за винятком генеративних особин *C. cirsioides*, у 1,15—3,7 рази збільшився вміст хлорофілу b (див. рисунок). Це й позначилося на співвідношеннях хлорофілу a до хлорофілу b (табл. 1, 2), а також хлорофілів до каротиноїдів.

Відомо, що співвідношення вмісту каротиноїдів до хлорофілу залежить переважно від умов освітлення. Цей показник також використовують для оцінки фізіологічного стану, фотосинтетичної активності, змін у розвитку (старіння) та реакції рослин на стрес [17—19]. Аналіз результатів досліджень показав, що умови росту 2021 р. також призвели до змін концентрацій пігментів, що позначилося на їхніх співвідношеннях. На тлі зниження вмісту Chl b у рослинах усіх вікових груп виду *C. onopordifolia* збільшився вміст каротиноїдів майже у 1,5—2 рази порівняно з іншими роками дослідження, що позначилося на співвідношенні Chl b до каротиноїдів. Цей показник був найнижчим за всі роки дослідження, що вказує на перебування рослин у доволі стресових умовах, оскільки вміст каротиноїдів знаходиться у прямій кореляційній залежності від гормону стресу — абсцизової кислоти. Відомо, що за високої інтенсивності світла зменшується кількість та розмір світлозбиральних комплексів фотосистем. Тому за таких умов фотозахисна роль каротиноїдів зростає [20], бо вони запобігають деструктивному фотоокисненню органічних сполук на світлі за наявності вільного кисню. У тіньовитривалого виду *C. cirsioides* теж відбулися функціональні зміни у складі пігментів, особливо у рослин прегенеративної групи. Усе це опосередковано вказує на зростання інтенсивності сонячної інсоляції у 2021 р. порівняно з іншими роками.

ТАБЛИЦЯ 1. Співвідношення пігментів у рослинах *C. oporordifolia* різних вікових груп

Вікова група	Роки	Chl <i>a/b</i>	Chl (<i>a + b</i>)/car	Chl <i>a</i> /car	Chl <i>b</i> /car
Іматурні	2017	3,77±0,07	2,58±0,14	2,04±0,11	0,55±0,03
	2018	3,77±0,05	3,37±0,03	2,21±0,03	1,15±0,01
	2021	3,63±0,09	1,47±0,21	1,15±0,17	0,32±0,05
	2023	3,99±0,19	3,22±0,12	2,57±0,10	0,64±0,01
Генеративні	2017	3,50±0,12	4,29±0,02	3,34±0,05	0,95±0,09
	2018	1,90±0,10	4,77±0,46	3,15±0,28	1,64±0,18
	2021	3,32±0,13	1,69±0,18	1,29±0,13	0,38±0,03
	2023	4,57±0,21	3,46±0,14	2,84±0,17	0,62±0,02
Віргінільні	2017	3,75±0,18	3,49±0,24	2,75±0,18	0,74±0,06
	2018	1,96±0,04	3,80±0,13	2,52±0,11	1,29±0,04
	2021	3,66±0,14	2,12±0,16	1,66±0,51	0,45±0,14

ТАБЛИЦЯ 2. Співвідношення пігментів у рослинах *C. cirsioides* різних вікових груп

Вікова група	Роки	Chl <i>a/b</i>	Chl (<i>a + b</i>)/car	Chl <i>a</i> /car	Chl <i>b</i> /car
Іматурні	2017	3,42±0,05	4,18±0,07	3,20±0,02	0,95±0,09
	2018	1,35±0,16	2,96±0,57	2,21±0,28	1,67±0,30
	2021	4,11±0,98	3,10±0,11	2,53±0,51	0,62±0,01
	2023	3,95±0,08	2,39±0,96	1,91±0,01	0,48±0,01
Генеративні	2017	3,48±0,02	6,16±0,12	4,89±0,02	1,41±0,03
	2018	4,47±0,31	3,86±0,07	2,28±0,40	0,51±0,08
	2021	4,44±0,91	4,54±0,32	3,69±0,14	0,85±0,09
	2023	4,68±0,21	2,85±0,10	2,35±0,11	0,51±0,01
Віргінільні	2017	3,36±0,09	3,62±0,04	2,79±0,11	0,83±0,07
	2018	2,04±0,02	4,42±0,02	3,17±0,08	1,70±0,02
	2021	4,24±0,03	5,28±0,12	4,27±0,32	1,01±0,23

Аналіз співвідношення Chl *a/b* показує, що найвищим цей показник (3,48—4,68) був у генеративних рослин *C. cirsioides*. У рослин *C. oporordifolia*, що ростуть на майже аналогічному гіпсометричному рівні, цей показник змінювався в межах 1,9—4,57 залежно від років дослідження. На противагу *C. cirsioides*, чітко вираженої відмінності у співвідношенні Chl *a/b* між рослинами різних вікових груп не виявлено.

Відомо, що на вміст хлорофілів у листках та їхнє співвідношення можуть впливати різні фактори навколишнього середовища. Світло є одним із основних факторів, що індукують синтез хлорофілів [21]. Крім світла, на синтез хлорофілу впливають температура, вода та наявність азоту. Зміни пігментного складу відповідають функціонуванню угруповання в умовах зміни навколишнього середовища. Діапазон змін вмісту пігментів вказує на адаптацію до стресових умов середовища [22].

Найвищий вміст та найширший діапазон варіювання концентрацій пігментів властивий рослинам прегенеративної групи виду *C. onopordifolia*. У виду *C. cirsioides* найвищий вміст пігментів спостерігався у рослин генеративної групи. Показано, що фотосинтетичний апарат обох видів динамічно реагує на зміну абіотичних умов. Найкритичнішими для цих видів виявилися умови 2018 р. і 2021 р. У 2018 р. у рослинах збільшився вміст хлорофілу Chl *b* у фотосинтетичному апараті, а у 2021 р. — вміст каротиноїдів. Особливо різко відреагував асиміляційний апарат *C. onopordifolia*.

Для глибшого розуміння взаємозалежності вмісту пігментів у ФСА досліджуваних видів було застосовано кореляційний аналіз, який відображає як взаємозалежність вмісту пігментів, так і силу та характер кореляційного зв'язку кожної групи пігментів із певними метеочинниками. Результати аналізу кореляційних матриць у 2018 р., у якому спостерігали вищий вміст Chl *b*, показав, що у рослин *C. onopordifolia* є слабка зворотна залежність вмісту Chl *a* ($r = -0,45$, $p < 0,001$) і *b* ($r = -0,38$, $p < 0,001$) від температури повітря (табл. 3).

У рослин виду *C. cirsioides* у 2018 р. спостерігали значну зворотну залежність між вмістом Chl *b* в листках, співвідношенням Chl *a/b* і температурою повітря, особливо її максимальними значеннями ($r = -0,58$, $p < 0,001$) та, навпаки, позитивну залежність від кількості опадів упродовж дня ($r = 0,54$, $p < 0,001$) (табл. 4). Іншими дослідниками також виявлено значну залежність функціонального стану фотосинтетичного апарату рослин від вологозабезпечення [23].

Як зазначалося, у 2021 р. в рослинах *C. onopordifolia* істотно зросла концентрація каротиноїдів. Аналіз кореляційних матриць за 2021 р. показав, що між кількістю опадів у денний період доби і вмістом усіх пігментів та їхніми співвідношеннями існує високий зворотний зв'язок ($r = -0,80$, $p < 0,001$). На вміст хлорофілів *a* і *b*, а також їхнє співвідношення впливає й кількість опадів упродовж доби, а показник Chl *a/b* знаходиться у зворотному значному зв'язку й від сумарної кількості опадів упродовж ночі (див. табл. 3).

На відмінну від рослин *C. onopordifolia*, кореляційна залежність між вмістом фотосинтетичних пігментів рослин виду *C. cirsioides* та кількістю опадів була позитивною. Причому для цих рослин істотне значення мають опади у нічний період доби. Водночас значний вплив на стан пігментів чинить і мінімальна температура поверхні ґрунту (див. табл. 4).

Результати досліджень 2023 р. теж свідчать про існування зворотної залежності між вмістом пігментів у рослинах *C. onopordifolia* та кількістю опадів. До того ж, вміст каротиноїдів перебуває у значній прямій позитивній залежності ($r = 0,60$, $p < 0,001$) від сумарної кількості опадів упродовж доби. Дещо слабший зворотний зв'язок виявлено між кількістю опадів та вмістом Chl *a* (див. табл. 3).

Стосовно виду *C. cirsioides* з'ясовано, що співвідношення між вмістом Chl *b* і каротиноїдами значною мірою визначає кількість опадів. Також для рослин цього виду виявлено зворотну кореляцію між мінімальними значеннями відносної вологості повітря та співвідношенням Chl *a/b* (див. табл. 4).

Таблиця 3. Кореляційна матриця фотосинтетичних пігментів рослини виду *C. ovorogfolia* та метеорологічних чинників

№	Параметри	2018							2021							2023							
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	
x ₁	Хлорофіт <i>a</i>	1,0							1,0							1,0							
x ₂	Хлорофіт <i>b</i>	0,93	1,0						0,97	1,0						0,93	1,0						
x ₃	Каротиноїди	0,49	0,43	1,0					0,60	0,61	1,0					0,54	0,60	1,0					
x ₄	Chl_ <i>a/b</i>	0,49	0,13	0,27	1,0				0,87	0,80	0,63	1,0				0,20	-0,60	-0,30	1,0				
x ₅	Tot_ chl/car	-0,08	0,01	- 0,88	-0,23	1,0			0,69	0,65	-0,15	0,54	1,0			0,86	-0,19	- 0,46	0,79	1,0			
x ₆	Chl_ <i>a/car</i>	-0,05	0,02	- 0,88	-0,15	0,99	1,0		0,69	0,65	-0,15	0,55	0,99	1,0		0,88	-0,29	- 0,45	0,86	0,99	1,0		
x ₇	Chl_ <i>b/car</i>	-0,12	0,02	- 0,87	-0,34	0,99	0,98	1,0	0,68	0,67	-0,15	0,51	0,99	0,99	1,0	-0,04	0,71	-0,14	- 0,47	0,17	0,04	1,0	
x ₈	Температура повітря (сер.)	- 0,45	- 0,38	-0,23	-0,32	0,11	0,09	0,16	0,07	0,10	0,04	0,02	0,05	0,05	0,06	-0,01	0,12	0,13	-0,08	-0,07	-0,08	0,03	
x ₉	Температура повітря (макс.)	-0,38	- 0,34	-0,12	-0,19	0,01	-0,01	0,05	0,29	0,29	0,04	0,15	0,28	0,28	0,29	0,03	0,21	0,10	-0,11	0,01	-0,02	0,17	
x ₁₀	Температура повітря (мін.)	-0,36	-0,27	-0,11	-0,31	0,02	0,01	0,08	-0,15	-0,10	-0,02	-0,10	-0,12	-0,13	-0,09	-0,01	-0,10	-0,04	0,06	0,01	0,01	-0,09	
x ₁₁	Температура на поверхні ґрунту (макс.)	-0,27	-0,29	-0,21	-0,01	0,12	0,13	0,12	0,18	0,20	0,06	-0,05	0,14	0,13	0,14	0,05	0,21	0,12	-0,08	0,02	-0,01	0,16	
x ₁₂	Температура на поверхні ґрунту (мін.)	-0,34	-0,28	-0,12	-0,24	0,03	0,02	0,08	-0,20	-0,14	-0,11	-0,19	-0,11	-0,11	-0,07	-0,07	-0,16	-0,11	0,03	-0,02	-0,01	-0,09	
x ₁₃	Відносна вологість повітря (сер.)	0,22	0,18	0,19	0,12	-0,16	-0,15	-0,17	-0,24	-0,14	-0,01	-0,19	-0,23	-0,24	-0,18	-0,08	-0,33	-0,28	0,13	0,04	0,06	-0,16	
x ₁₄	Відносна вологість повітря (мін.)	0,23	0,23	0,15	0,04	-0,08	-0,07	-0,07	-0,07	-0,02	0,14	-0,01	-0,17	-0,18	-0,14	-0,24	- 0,39	-0,27	0,04	-0,12	-0,09	-0,25	
x ₁₅	Хмарність загальна,	0,26	0,30	0,17	-0,02	-0,04	-0,04	-0,02	-0,28	-0,26	-0,12	-0,27	-0,21	-0,21	-0,20	-0,10	-0,34	-0,30	0,12	0,03	0,05	-0,15	
x ₁₆	Опади, мм сума за день	0,09	0,04	0,08	0,22	-0,08	-0,07	-0,09	- 0,79	- 0,75	- 0,76	- 0,80	- 0,70	- 0,69	- 0,71	- 0,39	-0,26	-0,17	- 0,39	- 0,37	- 0,38	-0,02	
x ₁₇	Опади, мм сума за ніч	-0,13	-0,20	0,48	0,05	- 0,47	- 0,46	-0,39	-0,39	-0,39	-0,30	- 0,46	-0,39	-0,39	-0,38	-0,21	0,12	0,04	-0,31	-0,24	-0,27	0,07	
x ₁₈	Опади, мм сума за добу	0,12	0,05	0,21	0,21	-0,21	-0,19	-0,22	- 0,47	- 0,46	-0,37	- 0,51	-0,37	-0,37	-0,39	-0,01	0,19	0,60	- 0,60	-0,19	-0,29	0,71	

Таблиця 4. Кореляційна матриця фотосинтетичних пігментів рослин виду *C. cirsiooides* та метеорологічних чинників

№	Параметри	2018							2021							2023							
		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	
x ₁	Хлорофіт <i>a</i>	1,0							1,0							1,0							
x ₂	Хлорофіт <i>b</i>	0,99	1,0						0,99	1,0						0,99	1,0						
x ₃	Каротиноїди	-0,40	-0,41	1,0					0,32	0,35	1,0					0,94	0,86	1,0					
x ₄	Chl <i>a/b</i>	0,42	-0,88	0,62	1,0				-0,78	-0,87	-0,29	1,0				0,76	-0,56	-0,46	1,0				
x ₅	Tot_chl/car	0,33	-0,11	0,05	0,19	1,0			0,17	0,15	-0,87	-0,15	1,0			0,38	-0,70	-0,87	0,77	1,0			
x ₆	Chl <i>a/car</i>	0,47	0,44	-0,47	-0,25	0,34	1,0		0,15	0,12	-0,89	-0,12	0,99	1,0		0,46	-0,70	-0,83	0,82	0,99	1,0		
x ₇	Chl <i>b/car</i>	-0,17	0,93	-0,67	-0,87	-0,05	0,59	1,0	0,26	0,25	-0,82	-0,26	0,99	0,99	1,0	-0,11	-0,56	-0,90	0,25	0,81	0,75	1,0	
x ₈	Температура повітря (сер.)	-0,41	0,01	-0,54	-0,36	0,01	0,05	0,14	-0,19	-0,25	-0,40	0,31	0,30	0,31	0,26	-0,07	-0,11	-0,05	0,01	-0,01	-0,01	-0,02	
x ₉	Температура повітря (макс.)	0,10	-0,01	0,19	0,17	-0,15	0,03	-0,08	-0,16	-0,19	-0,34	0,23	0,26	0,27	0,23	-0,08	-0,06	-0,03	-0,02	-0,02	-0,02	-0,01	
x ₁₀	Температура повітря (мін.)	0,14	-0,01	0,22	0,27	-0,02	-0,04	-0,09	-0,25	-0,31	-0,44	0,42	0,30	0,31	0,25	-0,03	-0,05	0,05	0,01	-0,07	-0,06	-0,12	
x ₁₁	Температура на поверхні ґрунту (макс.)	0,31	0,35	0,10	-0,16	-0,11	0,29	0,23	-0,19	-0,21	-0,22	0,20	0,13	0,14	0,11	-0,12	-0,04	0,01	-0,07	-0,07	-0,07	-0,03	
x ₁₂	Температура на поверхні ґрунту (мін.)	0,16	-0,03	0,15	0,25	0,01	0,02	-0,07	-0,21	-0,26	-0,39	0,35	0,27	0,28	0,23	-0,04	-0,04	0,09	0,01	-0,12	-0,11	-0,18	
x ₁₃	Відносна вологість повітря (сер.)	-0,07	0,06	-0,18	-0,13	0,17	0,12	0,09	-0,31	-0,34	-0,18	0,37	0,01	0,02	-0,03	0,23	0,16	0,21	0,09	-0,08	-0,05	-0,20	
x ₁₄	Відносна вологість повітря (мін.)	-0,02	0,09	-0,11	-0,14	0,05	0,05	0,12	-0,26	-0,32	-0,23	0,44	0,07	0,09	0,02	0,21	0,12	0,17	-0,42	-0,06	-0,04	-0,18	
x ₁₅	Хмарність загальна,	-0,12	0,03	-0,32	-0,11	0,08	0,14	0,13	0,02	0,03	0,22	-0,02	-0,23	-0,23	-0,22	0,12	0,05	0,19	0,07	-0,13	-0,10	-0,26	
x ₁₆	Опади, мм сума за день	-0,30	0,52	-0,59	-0,63	-0,16	0,37	0,64	0,23	0,31	0,36	-0,41	-0,23	-0,24	-0,17	0,39	0,44	0,64	0,31	0,10	0,9	0,14	
x ₁₇	Опади, мм сума за ніч	-0,18	-0,01	-0,16	-0,11	-0,01	-0,02	0,03	0,74	0,74	0,39	-0,74	-0,06	-0,09	0,06	0,16	0,07	0,22	0,14	0,16	0,15	-0,03	
x ₁₈	Опади, мм сума за добу	0,46	-0,63	0,59	0,73	0,17	-0,28	-0,67	0,35	0,43	0,47	-0,50	-0,28	-0,30	-0,22	-0,07	0,09	-0,27	-0,13	0,27	0,21	0,53	

Сила впливу температури залежить від водного режиму [24]. Результати наших досліджень також демонструють, що пігментний комплекс рослин дикої флори, до якої належать види роду *Carlina*, значною мірою залежить від вмісту вологи у середовищі. Отже, розуміння взаємодії температури та води на рослини буде необхідне для розробки ефективніших стратегій адаптації для компенсації впливу екстремальних температурних явищ, пов'язаних зі зміною клімату.

Таким чином, результати досліджень показали, що між вмістом пігментів, їхніми співвідношеннями у видів роду *Carlina* та метеопараметрами середовища існують кореляційні зв'язки. З'ясовано, що відмінності у ектопах росту видів *C. onopordifolia* і *C. cirsoides* позначилися на вмісті фотосинтетичних пігментів та їхніх співвідношеннях. Вміст фотосинтетичних пігментів у рослин тіньовитривалого виду *C. cirsoides* порівняно із світлолюбним *C. onopordifolia*, є нижчим на 24—39 %. Упродовж життєвого циклу у рослин регенеративної групи *C. onopordifolia* загальний вміст пігментів більший порівняно із генеративними рослинами. У генеративних рослин *C. cirsoides*, навпаки, загальний вміст пігментів вищий порівняно із рослинами регенеративної групи. Фотосинтетичний апарат обох видів динамічно реагує на зміну абіотичних умов. У 2018 р. у рослин збільшився вміст хлорофілу *b* у ФСА, а у 2021 р. — вміст каротиноїдів. Виявлено, що стан пігментного комплексу обох видів більшою мірою залежить від дефіциту або надлишку води, ніж від температури повітря.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Zahra N., Hafeez M.B., Ghaffar A., Kausar A., Zeidi M., Siddique K.H.M., Farooq M. Plant photosynthesis under heat stress: effects and management. *EEB*. 2023. N 206. 105178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105178>
2. Манько М.В., Олексійченко Н.О., Китаєв О.І. Особливості індукції флуоресценції хлорофілу в листках рослин культиварів *Acer Platanoides* L. в умовах міста Києва. *Наук. вісн. НЛТУ України*. 2016. N 26 (5). С. 102—109. <https://doi.org/10.1016/10.15421/40260515>
3. Rühl A.T., Eckstein L.O., Annette D.T. Future challenge for endangered arable weed species facing global warming: Low temperature optima and narrow moisture requirements. *Biol. Cons.* 2015. **182**. P 262—269. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.12.012>
4. Evans J.R. Improving photosynthesis. *Plant Physiol.* 2013. **162**. P. 1780—1793. <https://doi.org/10.1104/pp.113.219006>
5. Li H., Chang J., Chen H., Wang Z., Gu X., Wie C., Zang Y., Ma J., Yang J., Zang X. Exogenous melatonin confers salt stress tolerance to watermelon by improving photosynthesis and redox homeostasis. *Front. Plant Sci.* 2017. **8**. 295. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00295>
6. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації. Аналітична доповідь Іванюта С.П. (ред.). Київ: НІСД, 2020. 110 с.
7. Balabuch V.O. Yield shortfall of cereals in Ukraine caused by the changes in air temperature and precipitation amount. *Agr. Sci. Pract.* 2023. N 10(1). P. 31—53. <https://doi.org/10.15407/agrisp10.01.031>
8. Pospisil P. Production of reactive oxygen species by photosystem II as a response to light and temperature stress. *Front. Plant Sci.* 2016. **7**. 1950. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01950>
9. Gholamin R., Khayatnezhad M. The effect of end season drought stress on the chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters and yield in maize cultivars. *Sci. Res. Essay*. 2011. N 6. P. 5351—5357.

10. Hailemichael G., Catalina A., González M.R., Martin P. Relationships between water status, leaf chlorophyll content and photosynthetic performance in Tempranillo Vineyards. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* 2016. N 37 (2). P. 149–157.
11. Lewis S.C., King A.D. Dramatically increased rate of observed hot record breaking in recent Australian temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 2015. N 42. P. 7776–7784. <https://doi.org/10.1002/2015GL065793>
12. Perkins-Kirkpatrick S.E., Lewis S.C. Increasing trends in regional heatwaves. *Nat. Comm.* 2020. N 11. 3357.
13. Wellburn A.P. The spectral determination of chlorophyll *a* and *b*, as well as carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.* 1994. **144**, N 3. P. 307–313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
14. Pollastri S., Sukiran N.A., Jacobs B., Knight M.R. Chloroplast calcium signalling regulates thermomemory. *J. Plant Physiol.* 2021. **264**, N 2. 153470. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153470>
15. Ullah A., Zeb A., Saqib S.E., Kächele H. Constraints to agroforestry diffusion under the Billion Trees Afforestation Project (BTAP), Pakistan: policy recommendations for 10-BTAP. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. N 29. P. 68757–68775. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20661-9>
16. Грицак Л.Р., Нужина Н.В., Дробик Н.М. (2019). Особливості пігментного комплексу високогірних видів роду *Gentiana* L. флори Українських Карпат. Наук. зап. Терноп. держ. пед. ун-ту ім. Володимира Гнатюка. Сер. Біол. 2019. Вип. 75 (1). С. 129–140.
17. Gitelson A. Towards a generic approach to remote non-invasive estimation of foliar carotenoid-to-chlorophyll ratio. *J. Plant Physiol.* 2020. **252**. P. 153–227. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153227>
18. Souahi H. Impact of lead on the amount of chlorophyll and carotenoids in the leaves of *T. durum* and *T. aestivum*, *Hordeum vulgare* and *Avena sativa*. *Bio. Divers.* 2021. **29**, N 3. P. 207–210. <https://doi.org/10.15421/012125>
19. Zeng J., Ping W., Sanaeifar A., Xu X., Luo W., Sha J., Huang Z., Huang Y., Liu X., Zhan B., Zhang H., Li X. Quantitative visualization of photosynthetic pigments in tea leaves based on Raman spectroscopy and calibration model transfer. *Plant Methods.* 2021. **17**, N 4. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00704-3>
20. Сиваш О.О. Акумуляція сонячної енергії: фотосинтез чи штучні системи. *Biotech. Acta.* 2012. **5**, N 6. С. 27–38.
21. Hang Y., He N., Yu G. Opposing shifts in distributions of chlorophyll concentration and composition in grassland under warming. *Sci. Rep.* 2021. N 11. 15736. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95281-3>
22. Mitchell R.M., Wright J.P., Ames G.M. Species' traits do not converge on optimum values in preferred habitats. *Oecologia.* 2018. **186**, N 3. P. 719–729.
23. Baslam M., Sanz-Saez A. Editorial: Photosynthesis in a changing global climate: a matter of scale. *Front. Plant Sci.* 2023. N 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1158816>
24. Hatfield J.L., Prueger J.H. Temperature extremes: effect on plant growth and development. *Weather and Climate Ext.* 2015. N 10 (Part A). P. 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>

Отримано 25.01.2024

REFERENCES

1. Zahra, N., Hafeez, M.B., Ghaffar, A., Kausar, A., Zeidi, M., Siddique, K.H.M. & Farooq, M. (2023). Plant photosynthesis under heat stress: effects and management. *EEB*, No. 206, 105178. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.105178>
2. Man'ko, M.V., Oleksiychenko, N.O. & Kitaev, O.I. (2016). Some peculiarities of chlorophyll fluorescence induction in leaves of *Acer Platanoides* L. cultivars under conditions of Kyiv city. *Nauk. visn. NLTU Ukr.* No. 26(5), pp. 102-109 [in Ukrainian].
3. Rühl, A.T., Eckstein, L.O. & Annette, D.T. (2015). Future challenge for endangered arable weed species facing global warming: low temperature optima and narrow moisture requirements. *Biol. Con.*, No. 182, pp. 262-269. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.12.012>

4. Evans, J.R. (2013). Improving photosynthesis. *Plant Physiol.*, No. 162, pp. 1780-1793. <https://doi.org/10.1104/pp.113.219006>
5. Li, H., Chang, J., Chen, H., Wang, Z., Gu, X., Wie, C., Zang, Y., Ma, J., Yang, J. & Zang, X. (2017). Exogenous melatonin confers salt stress tolerance to watermelon by improving photosynthesis and redox homeostasis. *Front. Plant Sci.*, No. 8, 295. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00295>
6. Climate change: consequences and adaptation measures: analyst. report: Vaniuta S.P. (red.). Kyiv: NISD, 2020. 110 p [in Ukrainian].
7. Balabuch, V.O. (2023). Yield shortfall of cereals in Ukraine caused by the changes in air temperature and precipitation amount. *Agric. Sci. Pract.*, No. 10(1), pp. 31-53. <https://doi.org/10.15407/agrisp10.01.031>
8. Pospisil, P. (2016). Production of reactive oxygen species by photosystem II as a response to light and temperature stress. *Front. Plant Sci.*, No. 7, 1950. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01950>
9. Gholamin, R. & Khayatnezhad, M. (2011). The effect of end season drought stress on the chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters and yield in maize cultivars. *Sci. Res. Essay*, No. 6, pp. 5351-5357.
10. Hailemichael, G., Catalina, A., González, M.R. & Martin, P. (2016). Relationships between water status, leaf chlorophyll content and photosynthetic performance in Tempranillo Vineyards. *S. Afr. J. Enol. Vitic.*, No. 37 (2), pp. 149-157.
11. Lewis, S.C. & King, A.D. (2015). Dramatically increased rate of observed hot record breaking in recent Australian temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, No. 42, pp. 7776-7784. <https://doi.org/10.1002/2015GL065793>
12. Perkins-Kirkpatrick, S.E. & Lewis, S.C. (2020). Increasing trends in regional heatwaves. *Nat. Comm.*, No. 11, 3357.
13. Wellburn, A.P. (1994). The spectral determination of chlorophyll a and b, as well as carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.*, No. 144 (3), pp. 307-313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
14. Pollastri, S., Sukiran, N.A., Jacobs, B. & Knight, M.R. (2021). Chloroplast calcium signalling regulates thermomemory. *J. Plant Physiol.*, No. 264 (2), 153470. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153470>
15. Ullah, A., Zeb, A., Saqib, S.E. & Kächele, H. (2022). Constraints to agroforestry diffusion under the Billion Trees Afforestation Project (BTAP), Pakistan: policy recommendations for 10-BTAP. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, No. 29, pp. 68757-68775. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20661-9>
16. Hrytsak, L.R., Nuzhyna, N.V. & Drobyk N.M. (2019). Peculiarities of pigment complex of *Gentiana* L. high-mountain species of Ukrainian Carpathians flora. *Nauk. zap. Ternop. derz. pedah. un-tu im. Volodymyra Hnatiuka. Ser. Biol.*, No. 75 (1), pp. 129-140 [in Ukrainian].
17. Gitelson, A. (2020). Towards a generic approach to remote non-invasive estimation of foliar carotenoid-to-chlorophyll ratio. *J. Plant Physiol.*, No. 252, pp. 153-227. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2020.153227>
18. Souahi, H. (2021). Impact of lead on the amount of chlorophyll and carotenoids in the leaves of *Triticum durum* and *T. aestivum*, *Hordeum vulgare* and *Avena sativa*. *Bio. Div.*, No. 29(3), pp. 207-210. <https://doi.org/10.15421/012125>
19. Zeng, J., Ping, W., Sanaeifar, A., Xu, X., Luo, W., Sha, J., Huang, Z., Huang, Y., Liu, X., Zhan, B., Zhang, H. & Li, X. (2021). Quantitative visualization of photosynthetic pigments in tea leaves based on Raman spectroscopy and calibration model transfer. *Plant Methods*, No. 17 (4). <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00704-3>
20. Syvash, O.O. (2012). Accumulation of the sun energy: photosynthesis or artificial systems. *Biotechnol. Acta*, No. 5 (6), pp. 27-38 [in Ukrainian].
21. Hang, Y., He, N. & Yu, G. (2021). Opposing shifts in distributions of chlorophyll concentration and composition in grassland under warming. *Sci. Rep.*, No. 11, 15736. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95281-3>
22. Mitchell, R.M., Wright, J.P. & Ames, G.M. (2018). Species' traits do not converge on optimum values in preferred habitats. *Oecologia*, No. 186 (3), pp. 719-729.
23. Baslam, M. & Sanz-Saez, A. (2023). Editorial: Photosynthesis in a changing global climate: a matter of scale. *Front. Plant Sci.*, No. 14, <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1158816>

24. Hatfield, J.L. & Prueger, J.H. (2015). Temperature extremes: effect on plant growth and development. *Weather and Climate Ext.*, No. 10 (Part A), pp. 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>

Received 25.01.2024

THE INFLUENCE OF CLIMATE CONDITIONS ON THE CONTENT AND RATIO OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS IN PLANTS OF THE GENUS *CARLINA* L.

Kh.M. Kolisnyk, L.R. Hrytsak, N.M. Drobyk

Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University
2 Kryvonosa M. St., Ternopil, 46027, Ukraine
e-mail: kolisnyk@chem-bio.com.ua

Phytobiota is a state indicator of the environment, since the impact of various abiotic stresses on plants causes a number of physiological and biochemical changes in the photosynthetic apparatus. Rare plant species have a lower survival coefficient than more common species, and are also more sensitive to climate change. The content and ratio of photosynthetic pigments in plants of different age groups of species of the genus *Carlina* L. under natural growth conditions have been studied. It has been found that differences in growth ecotopes affected the content of photosynthetic pigments and their ratios. The chlorophylls concentration in the photosynthetic apparatus depends on the stage of ontogenesis, light, water and temperature regimes. In the species *Carlina onopordifolia*, which belongs to photophilous plants, the total pigments content was 23.96–39.35 % higher, compared to the shade-tolerant species *Carlina cirsioides*. Analysis of the pigment content dynamics during 2017–2023 showed that the photosynthetic apparatus of both species dynamically responded to changes in abiotic conditions. The general pattern for *C. onopordifolia* plants was the most significant changes over the years in the content of chlorophyll *a* and carotenoids in plants of all age groups. It has been found that the concentration of pigments in plants of the generative group of *C. onopordifolia* is lower compared to pregenerative plants. In *C. cirsioides* plants, which are in the generative stage of the life cycle, on the contrary, the total content of pigments was higher, compared to individuals of the pregenerative group. A correlation analysis was conducted between the content of photosynthetic pigments in plants of the genus *Carlina* and meteorological factors. Correlation analysis has showed that there are correlations between the content of pigments, their ratios in the studied species of the genus *Carlina* and the meteorological parameters of the environment. The strength and direction of these relationships varies depending on the years of the study. It has been found that the state of the pigment complex of both *C. onopordifolia* and *C. cirsioides* plants depends more on water deficit or excess than on air temperature.

Key words: *Carlina* L., rare species, photosynthetic pigments, meteorological parameters, correlation analysis.

ORCID

Х.М. КОЛІСНИК — <https://orcid.org/0009-0002-8517-2743>

Л.Р. ГРИЦАК — <https://orcid.org/0000-0002-2872-5201>

Н.М. ДРОБИК — <https://orcid.org/0000-0002-8927-8687>