

<https://doi.org/10.15407/frg2023.06.528>

УДК 57.045:581.132:633.1

ВПЛИВ КОРОТКОТРИВАЛИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ СТРЕСІВ І ПОМІРНОЇ ҐРУНТОВОЇ ПОСУХИ НА ПІГМЕНТНИЙ КОМПЛЕКС ПШЕНИЦІ, СПЕЛЬТИ І ЖИТА

К.О. РОМАНЕНКО, Л.М. БАБЕНКО, І.В. КОСАКІВСЬКА

*Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного Національної академії наук України
01004 Київ, вул. Терещенківська, 2
e-mail: katerynaromanenko4@gmail.com*

У лабораторних умовах досліджено вплив короткотривалих (2 год) теплового (+40 °С) і холодового (+4 °С) температурних стресів та помірної ґрунтової посухи (4 доби без поливу) на пігментний комплекс 14- та 18-добових рослин озимої пшениці сорту Подолянка, спельти сорту Франкенкорн та жита сорту Богуславка. Короткотривалий тепловий стрес індукував зменшення вмісту хлорофілів у всіх досліджених видів, найвиразніші зміни відбулись у листках жита. Показники співвідношення хлорофілів a/b та суми хлорофілів ($a+b$) до каротиноїдів зросли у листках спельти та жита і не змінилися у пшениці. Найстійкішим до дії високої температури виявився пігментний комплекс пшениці. За дії холодового стресу в листках жита істотно знизився вміст хлорофілу b та загальних каротиноїдів. Показник співвідношення суми хлорофілів ($a+b$) до каротиноїдів значно підвищився у листках пшениці. Пігментний комплекс жита виявився найчутливішим до дії низької позитивної температури, а спельти — найстійкішим. Після помірної ґрунтової посухи у листках 18-добових рослин спельти і жита зменшився вміст хлорофілів і загальних каротиноїдів, а також величина співвідношення ($a+b$)/каротиноїди. Найстійкішим до помірної ґрунтової посухи був пігментний комплекс пшениці. Отримані результати засвідчують, що до формування відповіді на дію температурних стресів та помірної ґрунтової посухи залучені адаптаційні перебудови пігментного комплексу культурних злакових рослин.

Ключові слова: пшениця, спельта, жито, фотосинтетичні пігменти, хлорофіл, каротиноїди, температурний стрес, посуха.

З фізіологічних процесів фотосинтезу займає особливе місце, оскільки є основним джерелом надходження органічних речовин і енергії, необхідних для життєдіяльності рослинного організму. В функціонуванні складної фотосинтетичної системи задіяні різні компоненти, зокрема фотосинтетичні пігменти, фотосистеми I і II, система транспорту електронів, шляхи відновлення CO_2 тощо, і пошкодження на будь-якому рівні, спричинене стресом, здатне призвести до зменшення фотосинтетичної активності та зниження продуктивності [1].

Цитування: Романенко К.О., Бабенко Л.М., Косаківська І.В. Вплив короткотривалих температурних стресів і помірної ґрунтової посухи на пігментний комплекс пшениці, спельти і жита. *Фізіологія рослин і генетика*. 2023. 55, № 6. С. 528—538. <https://doi.org/10.15407/frg2023.06.528>

Зміни у пігментному комплексі належать до неспецифічних реакцій культурних злаків на дію таких абіотичних стресорів, як висока і низька температура та посуха [2—5]. Хлорофіл *a* є основним пігментом, який бере участь у процесі фотосинтезу, а хлорофіл *b* виконує допоміжну функцію, спрямовану на підвищення світлозбиральної спроможності пігментного комплексу в короткохвильовій ділянці червоного світла [1]. Повідомлялось [5, 6], що зменшення вмісту хлорофілів *a* і *b* у рослинах гороху й пшениці, що зазнали дії високої температури, було зумовлене пригніченням біосинтезу пігментів та/або їх прискореною деградацією. Під час посухи у рослинах кукурудзи зменшувався вміст хлорофілу *b*, що змінювало співвідношення на користь хлорофілу *a* [7, 8]. Збільшення вмісту хлорофілу *b* і каротиноїдів за дії низької температури посилювало фотозахист [9]. Антиоксидантні ефекти каротиноїдів зумовлені їх здатністю нівелювати ушкодження, індуковані через утворення триплетного хлорофілу і синглетного кисню [10].

Показники вмісту і співвідношення фотосинтетичних пігментів характеризують стан фотосинтетичного апарату за стресових умов. Так, показник суми хлорофілів ($a+b$) корелює із продуктивністю фотосинтезу і є визнаним тестом для оцінювання впливу стресового чинника на рослини [11]. Ступінь сформованості й функціонування фотосинтетичного апарату за дії несприятливих екологічних чинників характеризує показник співвідношення між хлорофілами *a* і *b*. Зміни у співвідношенні хлорофілів відбуваються переважно внаслідок змін вмісту хлорофілу *a* [12]. Величину співвідношення хлорофілів a/b розглядають як одну з ознак фотосинтетичної активності [13], а за стресових умов використовують як маркер стійкості [14]. Інформативним показником інтенсивності ушкодження фотосинтетичного апарату є співвідношення суми хлорофілів до загальних каротиноїдів ($a+b$)/каротиноїди [15].

Метою нашої роботи було дослідити вплив короткотривалої високої та низької позитивної температури й помірної ґрунтової посухи на пігментний комплекс озимої пшениці (*Triticum aestivum* L.) сорту Подолянка, спельти (*Triticum spelta* L.) сорту Франкенкорн і жита (*Secale cereale* L.) сорту Богуславка.

Методика

Експерименти проводили у 2020—2022 рр. з рослинами озимої пшениці (*T. aestivum*) сорту Подолянка, півчастої пшениці (*T. spelta*) сорту Франкенкорн, озимого жита (*S. cereale*) сорту Богуславка. Зернівки озимої пшениці та жита використовували з колекції Інституту фізіології рослин і генетики НАН України (Київ), спельти — з колекції Національного центру генетичних ресурсів рослин України (Харків).

Відкалібровані зернівки стерилізували у 80 %-му розчині етилового спирту, промивали дистильованою водою і замочували на 3 год. Далі їх пророщували в термостаті у кюветах на змоченому дистильованою водою фільтрувальному папері за температури +24 °С упро-

довж 21 год. Зернівки, які наклюнулись, висаджували у посудини ємністю 2 л. Субстратом слугував прожарений річковий пісок. Рослини вирощували у контрольованих умовах за температури 20/17 °С (день/ніч), інтенсивності освітлення 690 мкмоль/(м² · с), фотоперіоду 16/8 год (день/ніч), відносної вологості повітря 65±5 % упродовж 14 діб, вологості субстрату 60 % повної вологоємності. Поливали щоденно розчином Кнопа з розрахунку по 50 мл на посудину.

Для моделювання гіпер- та гіпотермії 14-добові рослини піддавали короткотривалому (2 год) впливу температур +40 і +4 °С при зазначеному режимі вологості й освітлення. Умови ґрунтової посухи створювали припиненням поливу 14-добових рослин упродовж чотирьох наступних діб до моменту зниження вологоємності субстрату вдвічі (25—30 %) і в'янення листків.

Зразки листків для вимірювання вмісту фотосинтетичних пігментів відбирали після застосування короткотривалих теплового й холодового стресів і водного стресу. Для виділення пігментів наважки листків 200 мг розтирали у ступці з 0,5 г скляного піску і 0,5 г Na₂SO₄ (безводного). Розтерту суміш переносили на фільтри Шотта і екстрагували 100 %-м ацетоном до кінцевого об'єму екстракту 3 мл. У кювету вносили 3 мл ацетону і 0,2 мл екстракту. Вимірювали на спектрофотометрі Jenway UV-6850 (Велика Британія) за довжини хвилі 662, 644 і 440,5 нм; контролем слугував ацетон. Вміст пігментів визначали за формулою Хольм—Веттштейна [16]. Статистичний аналіз даних здійснювали за допомогою програми STATISTICA 10.0 (Analytical Software, Tallahassee, FL, USA). Отримані результати виражали як середнє арифметичне значення (μ) ± стандартне відхилення ($\pm\sigma$). Відмінності у середніх значеннях визначали однофакторним дисперсійним аналізом (one-way ANOVA). Критичний рівень значущості під час перевірки статистичних гіпотез у дослідженні приймали за $p \leq 0,05$. Експерименти проводили у трьох біологічних повтореннях. Для розрахунку статистичних показників обсяг вибірки для кожного зразка становив 9 вимірювань ($n = 9$).

Результати та обговорення

За дії короткотривалого теплового стресу вміст фотосинтетичних пігментів у листках 14-добових рослин пшениці, спельти і жита достовірно зменшився порівняно з контролем ($p \leq 0,05$), при цьому рослини озимої пшениці й жита виявились чутливішими. Вміст хлорофілів a , b і каротиноїдів у листках рослин зменшився відповідно: у пшениці — на 24, 21 і 14 %, спельти — 8, 18 і 23, жита — 21, 27 і 35 % (рис. 1).

Після короткотривалого теплового стресу показник суми хлорофілів ($a+b$) зменшився у рослинах пшениці й жита в 1,3 раза, у спельти в 1,1 раза. Співвідношення хлорофілів a/b у рослинах спельти і жита збільшилося на 12 і 9 % відповідно, тоді як у пшениці незначно зменшилося. Показник співвідношення суми хлорофілів ($a+b$) до каротиноїдів у рослинах спельти і жита за теплового стресу збіль-

ВПЛИВ КОРОТКОТРИВАЛИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ СТРЕСІВ

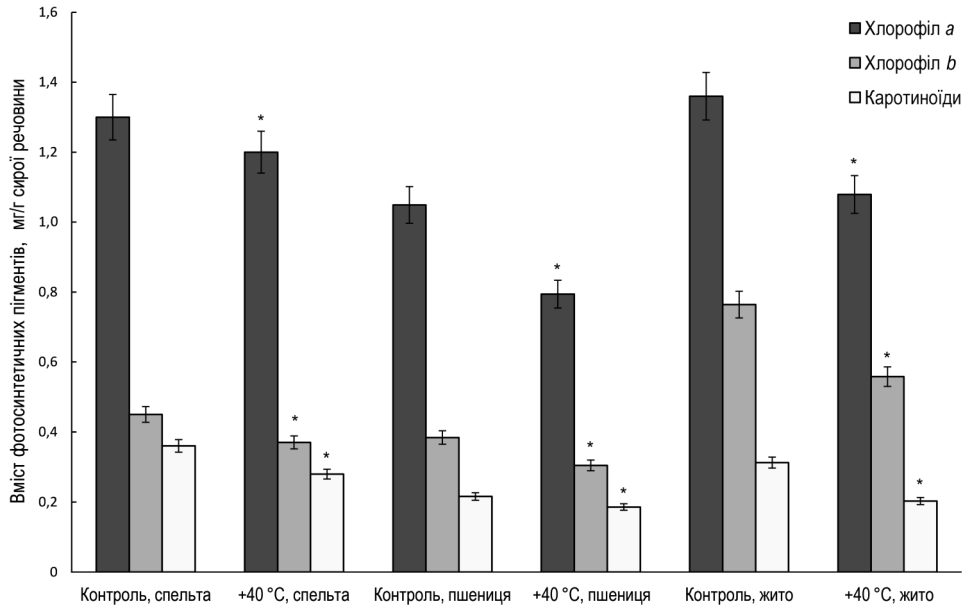


Рис. 1. Вплив короткотривалого теплового стресу (+40 °С, 2 год) на вміст фотосинтетичних пігментів у листках 14-добових рослин *T. spelta* сорту Франкенкорн, *T. aestivum* сорту Подолянка і *S. cereale* сорту Богуславка.

Тут і на рис. 2, 3: дані є середніми значеннями ($n = 9$); зірочкою позначено достовірні відмінності між показниками контрольної та експериментальної груп ($p \leq 0,05$)

шився відповідно на 15 і 19 %, натомість у пшениці він зменшився на 11 % (табл. 1).

За дії короткотривалої низької позитивної температури вміст фотосинтетичних пігментів у листках 14-добових рослин пшениці та жита зменшився, а у рослинах спельти Франкенкорн практично не відрізнявся від контролю. У листках пшениці відбулось незначне зменшення вмісту хлорофілу *a* (на 9 %), хлорофіл *b* був близький до контролю, а вміст загальних каротиноїдів знизився на 42 % порівняно з контролем. У листках спельти вміст хлорофілів *a*, *b* та каротиноїдів статистично не відрізнявся від контролю ($p \geq 0,05$). Значне

ТАБЛИЦЯ 1. Вплив короткотривалого теплового стресу (+40 °С, 2 год) на співвідношення фотосинтетичних пігментів у листках 14-добових рослин *T. spelta* сорту Франкенкорн, *T. aestivum* сорту Подолянка та *S. cereale* сорту Богуславка

Зразок	Хл ($a+b$), мг/г сирої речовини	Хл a/b	($a+b$)/каротиноїди
<i>T. spelta</i> , контроль	1,751±0,002	2,88	4,86
<i>T. spelta</i> , ТС	1,571±0,06*	3,24	5,61
<i>T. aestivum</i> , контроль	1,433±0,04	2,73	6,63
<i>T. aestivum</i> , ТС	1,099±0,07*	2,60	5,91
<i>S. cereale</i> , контроль	2,124±0,07	1,78	6,8
<i>S. cereale</i> , ТС	1,637±0,04*	1,93	8,06

Примітка. Тут і у табл. 2, 3: дані є середніми значеннями ($n = 9$); зірочкою позначено достовірні відмінності між показниками контрольної та експериментальної груп ($p \leq 0,05$). ТС — тепловий стрес.

зниження вмісту фотосинтетичних пігментів за дії холодowego стресу відбулось у рослинах жита: кількість хлорофілу *a* зменшилася на 17 %, хлорофілу *b* — на 42 %, загальних каротиноїдів — на 36 % порівняно з контролем (рис. 2).

Показник суми хлорофілів (*a+b*) у рослинах пшениці й спельти статистично не відрізнявся від контролю ($p \geq 0,05$), тоді як у рослинах жита зменшився в 1,3 раза. Співвідношення хлорофілів *a/b* у рослинах спельти і пшениці зменшилось на 8 і 11 % відповідно, натомість у рослинах жита збільшилось на 40 %. Величина співвідношення (*a+b*)/каротиноїди у листках спельти зменшилась неістотно порівняно з контролем, а у листках пшениці й жита збільшилась відповідно на 61 та 15 %, що зумовлено зниженням загального вмісту каротиноїдів (табл. 2).

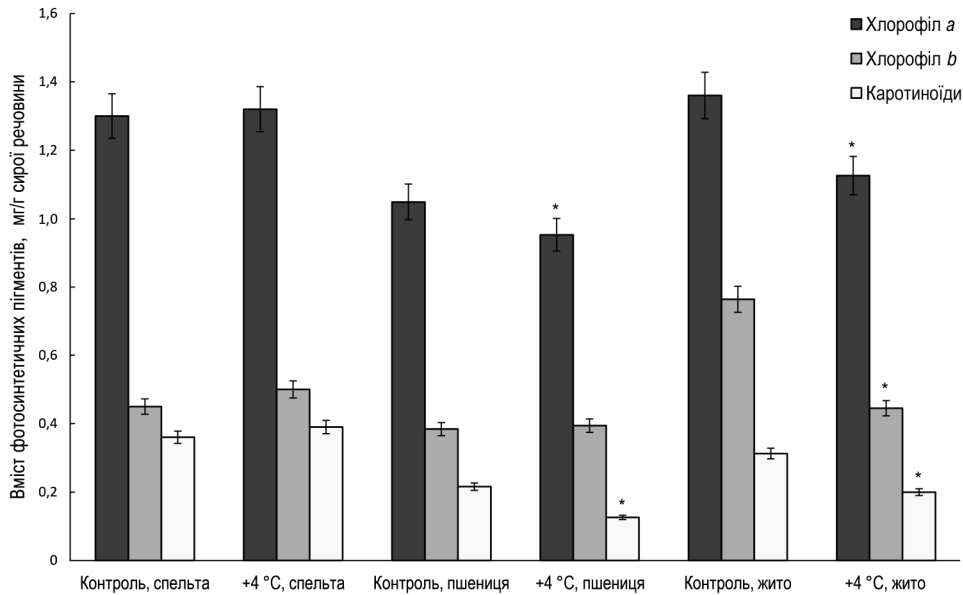


Рис. 2. Вплив низької позитивної температури (+4 °C, 2 год) на вміст фотосинтетичних пігментів у листках 14-добових рослин *T. spelta* сорту Франкенкорн, *T. aestivum* сорту Подольянка та *S. cereale* сорту Богуславка

ТАБЛИЦЯ 2. Вплив низької позитивної температури (+4 °C, 2 год) на співвідношення фотосинтетичних пігментів у листках 14-добових рослин *T. spelta* сорту Франкенкорн, *T. aestivum* сорту Подольянка та *S. cereale* сорту Богуславка

Зразок	Хл (<i>a+b</i>), мг/г сирової речовини	Хл <i>a/b</i>	(<i>a+b</i>)/каротиноїди
<i>T. spelta</i> , контроль	1,75±0,002	2,88	4,86
<i>T. spelta</i> , ХС	1,82±0,02	2,64	4,67
<i>T. aestivum</i> , контроль	1,433±0,04	2,73	6,63
<i>T. aestivum</i> , ХС	1,347±0,03	2,42	10,69
<i>S. cereale</i> , контроль	2,124±0,07	1,78	6,8
<i>S. cereale</i> , ХС	1,571±0,03*	2,5	7,8

Примітка: ХС — холодний стрес.

За умов помірної ґрунтової посухи вміст фотосинтетичних пігментів у листках 18-добових рослин пшениці, спельти і жита зменшився. Вміст хлорофілів *a*, *b* і каротиноїдів у листках рослин знизився відповідно: у пшениці — на 15, 8 і 6 %, спельти — 26, 28 і 12, жита — 39, 37 і 18 % (рис. 3).

Показник суми хлорофілів (*a+b*) зменшився у рослинах пшениці в 1,1 раза, спельти — в 1,4 раза, жита — в 1,6 раза (табл. 3). Величина співвідношення хлорофілів *a/b* зросла у листках спельти і дещо знизилася у жита і пшениці. Співвідношення (*a+b*)/каротиноїди зменшилося у листках жита на 25 %, спельти — 16, пшениці — на 7 % (див. табл. 3).

Результати наших досліджень показали, що за дії короткотривалих теплового і холодого температурних стресів та помірної ґрунтової посухи у листках рослин пшениці, спельти і жита відбулись ди-

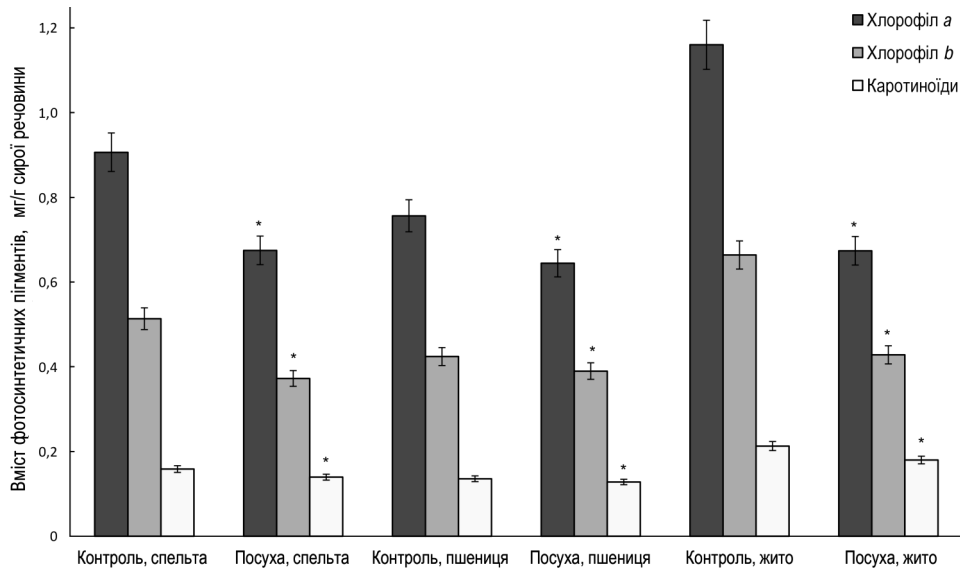


Рис. 3. Вплив помірної ґрунтової посухи (4 доби без поливу) на вміст фотосинтетичних пігментів у листках 18-добових рослин *T. spelta* сорту Франкенкорн, *T. aestivum* сорту Подолянка та *S. cereale* сорту Богуславка

ТАБЛИЦЯ 3. Вплив помірної ґрунтової посухи (4 доби без поливу) на співвідношення фотосинтетичних пігментів у листках 18-добових рослин *T. spelta* сорту Франкенкорн, *T. aestivum* сорту Подолянка та *S. cereale* сорту Богуславка

Зразок	Хл (<i>a+b</i>), мг/г сирої речовини	Хл <i>a/b</i>	(<i>a+b</i>)/каротиноїди
<i>T. spelta</i> , контроль	1,420±0,064	1,77	8,95
<i>T. spelta</i> , ГП	1,047±0,029*	1,81	7,51
<i>T. aestivum</i> , контроль	1,180±0,043	1,78	8,70
<i>T. aestivum</i> , ГП	1,034±0,03*	1,65	8,07
<i>S. cereale</i> , контроль	1,777±0,078	1,62	8,15
<i>S. cereale</i> , ГП	1,102±0,052*	1,57	6,12

Примітка: ГП — ґрунтова посуха.

ференційовані кількісні зміни пігментного комплексу. Фотосинтез доволі чутливий до змін температурного режиму, оскільки температурний стрес спричинює дисбаланс між світловою енергією, що поглинає фотосистема, та енергією, яку рослина витрачає на метаболічні процеси [17]. За оптимальної температури фотосинтез має найвищу ефективність, і будь-яке відхилення температури від цього оптимального діапазону призводить до зниження ефективності фотосинтезу [18]. Для одних і тих самих видів рослин температурний оптимум фотосинтезу нестабільний. Він залежить від віку рослини, адаптації до певних температур і може змінюватися протягом сезону [19]. Оптимальна температура фотосинтезу в середньому на 10–15 °С нижча від точки теплової депресії. Для більшості C₃-рослин помірного поясу оптимальна температура становить 20–25 °С [20].

Хлорофіл є одним із основних компонентів хлоропластів, а його вміст позитивно корелює зі швидкістю фотосинтезу. Після теплового стресу в фазу тривоги у 14-добових рослинах усіх досліджених видів злаків показник суми хлорофілів ($a+b$) зменшився, при цьому рослини жита морозостійкого сорту Богуславка виявилися вразливішими порівняно з пшеницею та спельтою. У листках пшениці й жита значно зменшився вміст обох хлорофілів, а у листках спельти — переважно хлорофілу b . Біосинтез фотосинтетичних пігментів є однією з перших мішеней, що зазнає впливу теплового стресу [6]. Пригнічення біосинтезу хлорофілу за дії високої температури зумовлене деградацією численних ензимів, задіяних у синтезі пігменту [5, 6]. Встановлено [21], що тривалий тепловий стрес призводить до зниження показників співвідношення суми хлорофілів ($a+b$) до каротиноїдів, а також до збільшення показника співвідношення хлорофілів a/b у листках вівсяниці високої (*Festuca arundinacea*), що зумовлено деградацією хлорофілу b через накопичення АФК у хлоропластах. Виразніші зміни спостерігались у чутливого до дії високої температури сорту вівсяниці [21]. Реакція на короткотривалу дію високої температури відображається у зміні показника співвідношення хлорофілів a/b , який дещо зріс у листках спельти морозостійкого сорту Франкенкорн і жита холодостійкого сорту Богуславка, натомість не змінився у рослинах пшениці сорту-стандарту Подолянка. За теплового стресу в листках спельти і жита збільшився також показник співвідношення суми хлорофілів ($a+b$) до каротиноїдів, тоді як у пшениці він зменшився. Загалом отримані результати засвідчили високий ступінь стійкості досліджених видів злаків до теплового стресу в фазу тривоги на початкових етапах вегетації. Найстійкішим до дії високої температури виявився пігментний комплекс пшениці сорту Подолянка.

За короткотривалої дії низької позитивної температури у листках 14-добових рослин пшениці та спельти у фазу тривоги показник суми хлорофілів був на рівні контролю, натомість у листках жита зменшився, що відбулось переважно за рахунок зниження вмісту хлорофілу b . Холодовий стрес індукував зменшення вмісту загальних каротиноїдів у пшениці й жита, а у спельти істотних змін не відбулось. Встановлено [12], що низька позитивна температура (+4 °С) негативно впливає на гени синтезу каротиноїдів, а динаміка накопичення каротиноїдів залежить від генетичних особливостей та фази розвитку

рослини. За холодого стресу показник співвідношення хлорофілів a/b у листках жита зріс, натомість у пшениці й спельти знизився. Збільшення показника співвідношення хлорофілів a/b в умовах стресу зазвичай пов'язане з розкладанням хлорофілу b [21], значне зменшення вмісту якого відбулось у листках жита. Їстотно збільшився показник співвідношення суми хлорофілів $(a+b)$ /каротиноїди у листках пшениці й дещо менше у жита, що пояснюється значним зменшенням вмісту загальних каротиноїдів за дії низької температури. Каротиноїди відіграють незамінну роль у фотосинтезі, включно поглинання світла, і є ключовою частиною системи антиоксидантного захисту рослини [22]. Це незамінні сполуки, задіяні у налагодженні зв'язків між рослиною та навколишнім середовищем [10].

Після помірної ґрунтової посухи на тлі в'янення листків відбулось зменшення вмісту фотосинтетичних пігментів у листках 18-добових рослин усіх досліджуваних злаків. Сума хлорофілів $(a+b)$ у листках посухостійкого сорту озимої пшениці Подолянка неістотно зменшилась, тоді як у екологічно пластичного сорту спельти Франкенкорн — в 1,35 раза, а у холодостійкого сорту жита Богуславка — в 1,6 раза, що вказує на зниження фотохімічної активності в рослинах спельти й жита і стабільність у рослинах пшениці. Зазначено [23], що зниження вмісту хлорофілів відбувається внаслідок окисного пошкодження фотосинтетичного апарату і належить до неспецифічних ознак окисного стресу. Про зниження вмісту хлорофілів у листках посухостійких і чутливих генотипів твердої пшениці за дії тривалої ґрунтової посухи повідомляли у дослідженні Almeselmani et al. [24], при цьому виразніші негативні зміни спостерігались у чутливих сортів. За дії посухи генотипи озимої пшениці з високою ефективністю транспірації характеризувались підвищеним вмістом хлорофілу [25]. Ми спостерігали незначні зміни показника співвідношення між хлорофілами у досліджуваних злаків за дії ґрунтової посухи. У рослинах пшениці й жита це співвідношення зменшилось, натомість у спельти збільшилось. У посухостійкого генотипу пшениці Подолянка зміна у співвідношенні хлорофілів була зумовлена переважно зменшенням вмісту хлорофілу a . Натомість у рослинах спельти і жита вміст обох хлорофілів знизився практично однаково, при цьому істотніші зміни відбулись у жита. Повідомлялось [26], що у посухостійких генотипів пшениці за стресових умов відбувається або незначне підвищення показника співвідношення хлорофілів a/b , або його невелике зменшення, тоді як у чутливих до посухи генотипів цей показник знижується швидко. За ґрунтової посухи вміст каротиноїдів у всіх трьох видів злакових рослин зменшився. Найістотніші зміни відбулись у рослинах жита, найменші — пшениці. Величина співвідношення $(a+b)$ /каротиноїди зменшилась у всіх досліджуваних видів, відчутніше у рослинах жита і спельти, що сигналізує про дестабілізацію у функціонуванні фотосинтетичного апарату за умов помірної ґрунтової посухи.

У формування відповіді на дію температурних стресів і помірної ґрунтової посухи залучені адаптаційні перебудови пігментного комплексу культурних злакових рослин. Якісні й кількісні зміни, зафіксовані нами, залежали від виду рослини і типу стресу. Короткотрива-

лий тепловий стрес індукував зменшення вмісту хлорофілів у всіх досліджених видів, найістотніші зміни відбулись у листках жита. Показник співвідношення хлорофілів a/b та суми хлорофілів $(a+b)$ до каротиноїдів зріс у листках спельти та жита і не змінився у пшениці. До дії високої температури найстійкішим виявився пігментний комплекс пшениці. За холодого стресу в листках жита значно знизився вміст хлорофілу b і загальних каротиноїдів. Показник співвідношення суми хлорофілів $(a+b)$ /каротиноїди істотно підвищився у листках пшениці. До дії низької позитивної температури найчутливішим виявився пігментний комплекс жита, а спельти — найстійкішим. Після в'яненням за умов помірної ґрунтової посухи у листках 18-добових рослин спельти і жита зменшився вміст хлорофілів і загальних каротиноїдів, а також величина співвідношення $(a+b)$ /каротиноїди. До помірної ґрунтової посухи найстійкішим був пігментний комплекс пшениці. Отже, отримані результати продемонстрували високу жаро- та посухостійкість пігментного комплексу пшениці сорту Подолянка.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національної академії наук України в рамках проєкту № III-82-17.463 «Гормональна регуляція росту та розвитку зернових культур під впливом негативних кліматичних факторів» (2019—2023).

REFERENCES

1. Ashraf, M. & Harris, P.J.C. (2013). Photosynthesis under stressful environments: an overview. *Photosynthetica*, 51, pp. 163-190. <https://doi.org/10.1007/s11099-013-0021-6>
2. Efeoglu, B. & Terzioglu, S. (2009). Photosynthetic responses of two wheat varieties to high temperature. *Eur. Asian. J. Bio. Sci.*, 3, pp. 97-106. <https://doi.org/10.5053/ejobios.2009.3.0.13>
3. Balouchi, H.R. (2010). Screening wheat parents of mapping population for heat and drought tolerance, detection of wheat genetic variation. *Int. J. Biol. Life Sci.*, 6, pp. 56-66.
4. Bijanzadeh, E. & Emam, Y. (2010). Effect of defoliation and drought stress on yield components and chlorophyll content of wheat. *Pak. J. Biol. Sci.*, 13, pp. 699-705. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2010.699.705>
5. Reda, F. & Mandoura, H.M.H. (2011). Response of enzymes activities, photosynthetic pigments, proline to low or high temperature stressed wheat plant (*Triticum aestivum* L.) in the presence or absence of exogenous proline or cysteine. *Int. J. Acad. Res.*, 3, pp. 108-115.
6. Dutta, S., Mohanty, S. & Tripathy, B.C. (2009). Role of temperature stress on chloroplast biogenesis and protein import in pea. *Plant Physiol.*, 150, pp. 1050-1061. <https://doi.org/10.1104/pp.109.137265>
7. Jaleel, C.A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Al-Juburi, H.J., Somasundaram, R. & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *Int. J. Agr. Biol.*, 11, pp. 100-105.
8. Jain, M., Tiwary, S. & Gadre, R. (2010). Sorbitol-induced changes in various growth and biochemical parameters in maize. *Plant Soil Envir.*, 56, pp. 263-267. <https://doi.org/10.17221/233/2009-pse>
9. Adam, S. & Murthy, S.D.S. (2014). Effect of cold stress on photosynthesis of plants and possible protection mechanisms. In Gaur, R. & Sharma, P. (Eds.) *Approaches to plant stress and their management* (pp. 219-226), Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1620-9_12
10. Gomez-Sagasti, M.T., Lopez-Pozo, M., Artetxe, U., Becerril, J.M., Hernandez, A., Garcia-Plazaola, J.I. & Esteban, R. (2023). Carotenoids and their derivatives: a «Swiss Army knife-like» multifunctional tool for fine-tuning plant-environment interactions. *Envir. Exp. Bot.*, 207, p. 105229. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105229>

11. Bailey, S., Horton, P. & Walters, R.G. (2004). Acclimation of *Arabidopsis thaliana* to the light environment: the relationship between photosynthetic function and chloroplast composition. *Planta*, 218, No. 5, pp. 793-802. <https://doi.org/10.1007/s00425-003-1158-5>
12. Yang, Y.-Z., Li, T., Teng, R.-M., Han, M.-H. & Zhuang, J. (2021). Low temperature effects on carotenoids biosynthesis in the leaves of green and albino tea plant (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze). *Sci. Hort.*, 285, 110164. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110164>
13. Johnston, M., Grof, C.P.L. & Brownell, P.F. (1989). Chlorophyll a/b ratios and photosystem activity of mesophyll and bundle sheath fractions from sodium-deficient C₄ plants. *Aust. J. Plant Physiol.*, 16, pp. 449-457. <https://doi.org/10.1071/PP9890449>
14. Loggini, B., Scartazza, A., Brugnoli, E. & Navari-Izzo, F. (1999). Antioxidant defense system, pigment composition and photosynthetic efficiency in two wheat cultivars subjected to drought. *Plant Physiol.*, 119, No. 3, pp. 1091-1099. <https://doi.org/10.1104/pp.119.3.1091>
15. Kosakivska, I.V., Babenko, L.M., Romanenko, K.O. & Futorna, O.A. (2020). Effects of exogenous bacterial quorum sensing signal molecule (messenger) N-hexanoyl-L-homoserine lactone (C₆-HSL) on morphological and physiological responses of winter wheat under simulated acid rain. *Dopov. Nac. Akad. nauk Ukr.*, No. 8, pp. 92-100. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.08.092>
16. Wellburn, A. (1994). The spectral determination of chlorophyll *a* and chlorophyll *b*, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. *J. Plant Physiol.*, 144, No. 3, pp. 307-313. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)81192-2](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
17. Berry, J. & Bjorkman, O. (1980). Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 31, No. 1, pp. 491-543. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.31.060180.002423>
18. Li, D. (2018). The plant functional traits of arid and semiarid grassland plants under warming and precipitation change. In Ratnadewi, D. & Hamim (Eds.). *Plant growth and regulation-alterations to sustain unfavorable conditions*. Intech Open. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79744>
19. Liu, Y. (2020). Optimum temperature for photosynthesis: from leaf- to ecosystem-scale. *Sci. Bull. (Beijing)*, 65, No. 8, pp. 601-604. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.01.006>
20. Gong, C.M., Ning, P.B. & Wang, G.X.A. (2009). Review of adaptable variations and evolution of photosynthetic carbon assimilating pathway in C₃ and C₄ plants. *Chin. J. Plant Ecol.*, 33, pp. 206-221.
21. Cui, L., Li, J., Fan, Y., Xu, S. & Zhang, Z. (2006). High temperature effects on photosynthesis, PSII functionality and antioxidant activity of two *Festuca arundinacea* cultivars with different heat susceptibility. *Bot. Stud.*, 47, No. 1, pp. 61-69.
22. Simkin, A.J., Kapoor, L., Doss, C.G.P., Hofmann, T.A., Lawson, T. & Ramamoorthy, S. (2022). The role of photosynthesis related pigments in light harvesting, photoprotection and enhancement of photosynthetic yield in planta. *Photosynth. Res.*, 152, No. 1, pp. 23-42. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00892-6>
23. Anjum, S.A., Xie, X., Wang, L.C., Muhammad, S.F., Man, C. & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *Afr. J. Agr. Res.*, 6, pp. 2026-2032. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>
24. Almeselmani, M., Abdullah, F., Hareri, F., Naaesan, M., Adel Ammar, M., ZuherKanbar, O. & Alrzak Saud, A. (2011). Effect of drought on different physiological characters and yield component in different varieties of Syrian durum wheat. *J. Agr. Sci.*, 3, pp. 127-133. <https://doi.org/10.5539/JAS.V3N3P127>
25. Fotovat, R., Valizadeh, M. & Toorchi, M. (2007). Association between water-use efficiency components and total chlorophyll content (SPAD) in wheat (*Triticum aestivum* L.) under well-watered and drought stress conditions. *J. Food Agr. Env.*, 5, pp. 225-227.
26. Ashraf, M.Y., Azmi, A.R., Khan, A.H. & Ala, S.A. (1994). Effect of water stress on total phenol, peroxidase activity and chlorophyll contents in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Acta Physiol. Plant.*, 16, pp. 185-191.

Отримано 17.11.2023

PIGMENT COMPLEX IN WHEAT, SPELT WHEAT, AND RYE UNDER SHORT-TERM TEMPERATURE STRESSES AND MODERATE SOIL DROUGHT

K.O. Romanenko, L.M. Babenko, I.V. Kosakivska

M.G. Kholodny Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine
2 Tereshchenkivska St., Kyiv, 01601, Ukraine
e-mail: katerynaromanenko4@gmail.com

In controlled laboratory conditions, we investigated the impact of short-time (2 h) high-temperature stress (+40 °C), low positive temperature stress (+4 °C), and moderate soil drought (4 days without watering) on the pigment complex of 14- and 18-day-old winter wheat plants cv. Podolyanka, spelt wheat cv. Frankenkorn, and winter rye cv. Bohuslavka. Short-term high-temperature stress resulted in a reduction in chlorophyll content in all studied species, with the most significant changes observed in rye leaves. The chlorophyll *a/b* ratio and the sum of chlorophylls (*a+b*) to carotenoids increased in spelt wheat and rye leaves but remained unchanged in wheat. Wheat exhibited the highest resistance to elevated temperatures. Under cold stress, the content of chlorophyll *b* and total carotenoids in rye leaves notably decreased. In wheat leaves, the ratio of the sum of chlorophylls (*a+b*) to carotenoids significantly increased. Rye's pigment complex demonstrated the greatest sensitivity to low positive temperatures, while spelt wheat's complex exhibited the highest resistance. Under moderate soil drought, the content of chlorophylls and total carotenoids, along with the (*a+b*)/carotenoids ratio, decreased in the leaves of 18-day-old spelt wheat and rye plants. Wheat's pigment complex showed the most resistance to moderate soil drought. Overall, our findings suggest that adaptive adjustments in the pigment complex of cultivated cereal plants contribute to their response to temperature stress and moderate soil drought.

Key words: wheat, spelt, rye, photosynthetic pigments, chlorophyll, carotenoids, temperature stress, drought.

ORCID

K.O. РОМАНЕНКО — K.O. Romanenko <https://orcid.org/0000-0003-0456-4412>

Л.М. БАБЕНКО — L.M. Babenko <https://orcid.org/0000-0001-5391-9203>

І.В. КОСАКІВСЬКА — I.V. Kosakivska <https://orcid.org/0000-0002-2173-8341>