

Н.М. ТОПЧІЙ, О.О. СИВАШ

Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України
вул. Терещенківська, 2, Київ, 01601, Україна
nataliya_topchiy@yahoo.co.uk

СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОСИНТЕ- ТИЧНОГО АПАРАТУ ГОРОХУ (*PISUM SATIVUM* L.) В УМОВАХ ВАРІАЦІЇ СПЕКТРАЛЬНОГО СКЛАДУ СВІТЛА В ЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ

Ключові слова: фотосинтетичний апарат, *Pisum sativum*,
флуоресценція, пігмент-білкові комплекси.

Реакції фотосинтетичного апарату (ФСА) вищих рослин на варіації інтенсивності освітлення, що проявляються у зміні пігментного складу [12, 17], розмірі світлозбиральної антени фотосистеми II (ФСII) [12], вмісті цитохрому *b₆/f* [13] та реакційних центрів фотосистем [12], активності АТФ-синтази [11] та Рубіско [15], рівні мінорних пігмент-білкових комплексів [8], досить добре вивчені. Проте вплив зміненого спектрального складу світла на особливості структурно-функціональної відповіді ФСА досліджений недостатньо, хоча показано, що ФСА реагує на дію спектрального складу світла шляхом змін стехіометрії фотосистем, вмісту пігментів [10]. Вивчення характеру такої відповіді необхідне для розв'язання теоретичних питань стосовно закономірностей регуляції фотосинтетичної діяльності, адаптації рослин до світлових умов, а також практичних проблем оптимізації умов вирощування рослин у закритому ґрунті, адже основним фактором, який впливає на формування та функціонування ФСА за штучного освітлення, є спектральний склад світла.

Внаслідок великої різноманітності джерел штучного освітлення та значної відмінності їх спектрів від сонячного, недостатньо з'ясовані відповіді ФСА на зміну умов освітлення. Спектр більшості люмінесцентних ламп, на відміну від сонячного, має досить невеликий вміст променів у червоній області (660—680 нм) при значному випромінюванні у синій та зеленій областях [4]. Показано, що збільшення частки червоного світла у світлопоточі завдяки комбінуванню ламп білого та червоного освітлення призводить до зміни морфологічних показників рослин, вмісту пігментів, фотохімічної активності хлоропластів, швидкості нециклічного фотофосфорилування, активності ферментів циклу Кальвіна [1]. Для оптимального розвитку ФСА, росту, морфогенезу та продуктивності рослин у закритому ґрунті найефективнішими є такі співвідношення окремих ділянок спектра: 25—30 % — у синій області (380—490 нм), 20 % — у зеленій (490—590 нм) та 50 % — у червоній (600—700 нм) [3].

© Н.М. ТОПЧІЙ, О.О. СИВАШ, 2005

Використання світлодіодів як додаткового джерела світла дозволяє коригувати спектр люмінесцентних ламп і сприяє створенню оптимальних умов для рослин у закритому ґрунті. Метою даної роботи було вивчення структурно-функціональних характеристик ФСА *P. sativum*, сформованого за умов варіації спектрального складу світла у червоному діапазоні за допомогою світлодіодів.

Матеріал і методи досліджень

Об'єктом дослідження стали рослини *Pisum sativum* L., вирощені на середовищі Кнопа протягом 14 діб за температури 22 °С та фотоперіоді 14 год. Джерелом фонового освітлення були люмінесцентні лампи ЛБ-40 (Полтава, Україна) інтенсивністю 60 та 310 мкмоль · м⁻² · с⁻¹. Червоне світло світлодіодів (L-53SRC-F, λ_{max} = 660 нм, Δλ = 20 нм, «viewing angle» — 30 °, «Kingbright, Rheinmetall Elektronik», Німеччина) зі щільністю потоку фотонів 15 мкмоль · м⁻² · с⁻¹ додавали до фонового освітлення рослин люмінесцентними лампами. Щільність потоку фотонів на рівні рослин визначали за допомогою сферичного мікроквантового сенсора US-SQS та вимірювального пристрою LI-COR (LI-250), США.

Флуоресценцію хлорофілу в листках гороху вимірювали за допомогою ХЕ-РАМ флуорометра («Walz», Німеччина). Мінімальний рівень флуоресценції (F_0) в адаптованих до темряви листках визначали дією модульованого (міряючого, 2 Гц) світла досить низької інтенсивності (~0,1 мкмоль · м⁻² · с⁻¹). Максимальний рівень флуоресценції адаптованих до темряви (F_m) та світла (F'_m) листків встановлювали за дією короткого насичуючого імпульсу (1 сек) галогенної лампи інтенсивністю 5000 мкмоль · м⁻² · с⁻¹. Флуоресцентні вимірювання проводили після 5 хв темної адаптації. Максимальний (F_v/F_m) та ефективний (F'_v/F'_m) квантові виходи обчислювали за [14, 16]. Фотохімічне гасіння (qP) визначали як $(F'_m - F_s)/(F'_m - F_0)$, нефотохімічне (qN) — $1 - (F'_m - F_0)/(F_m - F_0)$ [9]. Параметри флуоресценції хлорофілу вимірювали при дії актинічного світла 500 та 1000 мкмоль · м⁻² · с⁻¹. Дані у форматі файлів Excel записували за допомогою мультимера UT-60E (Тайвань), з'єднаного з комп'ютером.

Пігмент-білкові комплекси тилакоїдних мембран аналізували за допомогою ДДС-Na-електрофорезу в поліакриламідному гелі за [6]. Концентрацію хлорофілу визначали у 80 %-му розчині ацетону за [7]. Після електрофорезу гелі сканували та аналізували за допомогою програми TotalLab (V1.10).

Досліди виконано у чотири- та п'ятикратній повторностях, з отриманих даних виводили середні арифметичні показники із стандартною похибкою.

Результати досліджень та їх обговорення

Проведені дослідження показали, що параметри кривої індукції флуоресценції хлорофілу гороху залежать від інтенсивності та спектрального складу світла при вирощуванні рослин. Величина максимального квантового вихо-

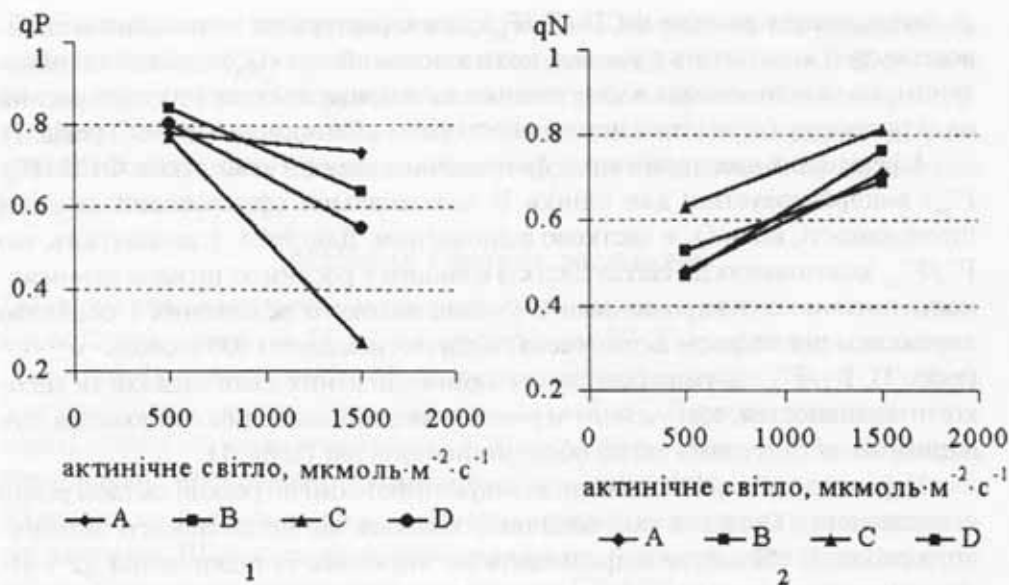
ду фотохімічних реакцій ФСII (F_v/F_m), що характеризує потенційні можливості пулу її комплексів в умовах, коли хіноновий пул (Q_A) є повністю окисленим, мало відрізнялась в адаптованих до темряви листках усіх груп рослин на актинічному світлі різної інтенсивності (500 і 1500 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) (табл. 1).

Ефективний квантовий вихід фотохімічних реакцій комплексів ФСII (F'_v/F'_m) використовується для оцінки їх максимальної ефективності за даної інтенсивності, коли Q_A є частково відновленим. Дані табл. 1 засвідчують, що F'_v/F'_m адаптованих до світла листків є вищим у рослин за низької інтенсивності порівняно з вирощеними в умовах високого освітлення і особливо вираженим під впливом актинічного світла інтенсивністю 500 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ (табл. 1). F'_v/F'_m за умов освітлення люмінесцентних ламп низької та високої інтенсивностей, збагаченого червоним випромінюванням світлодіодів, був вищим на актинічному світлі обох інтенсивностей (табл. 1).

Параметри qP і qN визначали, активуючи фотохімічні реакції світлом різної інтенсивності. Оскільки їхні величини залежать від інтенсивності актинічного світла, її збільшення призводить до зниження та підвищення qP і qN відповідно (рисунок). Зміна цих параметрів пов'язана зі зростанням ступеня відновлення хінонового пулу (Q_A) і теплової дисипації поглинутих квантів. На рисунку показана залежність qP і qN від інтенсивності актинічного світла. Так, за високої інтенсивності білого світла рослини, відповідно, мали вище та нижче значення параметрів qP та qN відносно вирощених на низькому (табл. 1). Зростання величини qP є особливо вираженим при інтенсивності актинічного світла 1500 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, що свідчить про суттєве підвищення

Таблиця 1. Характеристика параметрів кривих індукції флуоресценції хлорофілу *P. sativum*, вирощеного на світлі різної інтенсивності та спектрального складу

Інтенсивність світла, $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Активне світло			
	F_v/F_m	qP	qN	F'_v/F'_m
	500 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$			
біле (310)	0,71 ± 0,062	0,78 ± 0,007	0,48 ± 0,012	0,43 ± 0,01
біле + червоне (310 + 15)	0,78 ± 0,022	0,84 ± 0,009	0,47 ± 0,03	0,63 ± 0,01
біле (60)	0,80 ± 0,08	0,77 ± 0,024	0,63 ± 0,005	0,56 ± 0,037
біле + червоне (60 + 15)	0,77 ± 0,007	0,8 ± 0,034	0,53 ± 0,01	0,6 ± 0,039
	1500 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$			
біле (310)	0,71 ± 0,07	0,73 ± 0,015	0,71 ± 0,007	0,35 ± 0,018
біле + червоне (310 + 15)	0,77 ± 0,004	0,64 ± 0,034	0,76 ± 0,035	0,48 ± 0,035
біле (60)	0,78 ± 0,009	0,27 ± 0,01	0,81 ± 0,008	0,39 ± 0,008
біле + червоне (60 + 15)	0,76 ± 0,001	0,55 ± 0,09	0,69 ± 0,036	0,49 ± 0,015



Залежність фотохімічного (1) та нефотохімічного (2) гасіння флуоресценції хлорофілу від інтенсивності актинічного світла у листках *Pisum sativum* L.: A — біле світло (310 мкмоль · м⁻² · с⁻¹), B — біле (310 мкмоль · м⁻² · с⁻¹) + червоне (15 мкмоль · м⁻² · с⁻¹) світло, C — біле світло (60 мкмоль · м⁻² · с⁻¹), D — біле (60 мкмоль · м⁻² · с⁻¹) + червоне (15 мкмоль · м⁻² · с⁻¹) світло

The dependence of photochemical (1) and non-photochemical (2) quenching of chlorophyll fluorescence on the actinic light intensity in *P. sativum* L. leaves: A — white light (310 mmol · m⁻² · s⁻¹), B — white (mmol · m⁻² · s⁻¹) + red light (15 mmol · m⁻² · s⁻¹), C — white light (60 mmol · m⁻² · s⁻¹), D — white (60 mmol · m⁻² · s⁻¹) + red (15 mmol · m⁻² · s⁻¹) light

окисленості Q_A (рисунок). Величина qP , за результатами досліджень, збільшується в разі збагачення освітлення люмінесцентних ламп червоним випромінюванням світлодіодів вузького спектрального діапазону, особливо на фоні низькоінтенсивного освітлення та дії актинічного світла 1500 мкмоль · м⁻² · с⁻¹ (рисунок). Зауважимо, що така закономірність не спостерігалася у рослин, вирощених при 310 мкмоль · м⁻² · с⁻¹ на актинічному світлі, інтенсивністю 1500 мкмоль · м⁻² · с⁻¹ (табл. 1). Зростання qP , що відображає ступінь окисленості хінонового пулу Q_A , пов'язане, очевидно, із швидшим окисленням пластохінону комплексом цитохромів b_6/f внаслідок прискорення відтоку електронів до ФСІ. Оскільки фотохімічні реакції, флуоресценція і теплова дисипація є конкурентними процесами, підвищення qP призводить до зниження qN . Так, за умов збагачення освітлення люмінесцентних ламп червоним випромінюванням світлодіодів рослини характеризуються нижчим значенням параметра qN .

Світлозбираючі властивості ФСА рослин залежать від вмісту пігментів. Наші дані, отримані раніше, засвідчують, що збільшення частки червоного світла у світлопотіці люмінесцентних ламп низької та високої інтенсивності призводить до підвищення вмісту хлорофілів a , b і каротиноїдів [5]. Оскільки

ки пігменти в хлоропластах зв'язані з білковими комплексами, необхідно було вивчити вплив спектральних умов вирощування на склад і співвідношення пігмент-білкових комплексів тилакоїдних мембран.

Пігмент-білкові комплекси тилакоїдних мембран аналізували за вмістом хлорофілу в зелених зонах, розділених методом неденатуруючого ДДС-На електрофорезу, який дозволяє отримати цілісні комплекси з мінімальним відокремленням від білків пігментів та ліпідів. При електрофоретичному розділенні було виявлено і позначено за номенклатурою [6] п'ять пігмент-протейнових комплексів тилакоїдних мембран: CP1a — найбільший за молекулярною вагою — включає комплекс реакційного центру (РЦ) ФСІ та власний світлозбиральний комплекс (СЗКІ); CP1 — комплекс реакційного центру ФСІ без СЗКІ; LHCP¹ та LHCP³ — олігомерна і мономерна форми СЗКІІ відповідно; CPa — пігмент-білковий комплекс антени ФСІІ та вільний хлорофіл (FP), який відокремлюється від білків внаслідок дії ДДС-На (табл. 2, 3).

Таблиця 2. Розподіл хлорофілу у пігмент-білкових комплексах тилакоїдів гороху, вирощеного за високою інтенсивністю

Пігмент-білкові комплекси	% від загальної кількості хлорофілу на гелі	
	Інтенсивність світла, мкмоль · м ⁻² · с ⁻¹	
	біле (310)	біле + червоне (310 + 15)
CP1a + CP1	16,45 ± 1,01	16,47 ± 0,71
LHCP ¹	24,1 ± 2,23	27,75 ± 1,24
CPa	4,45 ± 0,86	5,4 ± 1,33
LHCP ³	33,96 ± 4,7	30,81 ± 2,5
FP	21,8 ± 1,5	20,5 ± 2,5
LHCP ¹ + LHCP ³	58,1 ± 1,8	58,55 ± 2,05
LHCP ³ /LHCP ¹	1,6 ± 0,3	1,18 ± 0,2

Таблиця 3. Розподіл хлорофілу у пігмент-білкових комплексах тилакоїдів гороху, вирощеного за низької інтенсивності

Пігмент-білкові комплекси	% від загальної кількості хлорофілу на гелі	
	Інтенсивність світла, мкмоль · м ⁻² · с ⁻¹	
	біле (60)	біле + червоне (60 + 15)
CP1a + CP1	19,8 ± 1,08	21,63 ± 1,65
LHCP ¹	16,74 ± 1,7	18,45 ± 1,02
CPa	2,5 ± 0,58	3,0 ± 0,62
LHCP ³	44,5 ± 0,91	42,68 ± 1,68
FP	16,8 ± 3,32	14,55 ± 2,7
LHCP ¹ + LHCP ³	61,24 ± 2,61	61,13 ± 2,7
LHCP ³ /LHCP ¹	2,7 ± 0,22	2,31 ± 0,04

Розподіл хлорофілу у пігмент-білкових комплексах тилакоїдів гороху, вирощеного під люмінесцентними лампами високої ($310 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) та низької ($60 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) інтенсивності, а також з додаванням до фонового освітлення рослин червоного випромінювання світлодіодів, представлено в таблицях 2 і 3. Збагачення червоним випромінюванням світлопотуку ламп як низької, так і високої інтенсивності не призводило до збільшення вмісту пігмент-білкових комплексів ФСІ (CP1a + CP1). Загальний вміст СЗКІІ, представленого олігомерною (LHCP¹) та мономерною формами (LHCP³), також практично не змінювався у рослин за умов підсвічування на фоні як високо-, так і низькоінтенсивного білого світла червоним випромінюванням люмінесцентних ламп різної інтенсивності. Однак спостерігався перерозподіл відносних часток олігомерної та мономерної форм СЗКІІ. За даними таблиць 2 і 3 при додаванні червоного випромінювання до фонового освітлення кількість олігомерних форм збільшується, тоді як вміст мономерних, навпаки, зменшується. Натомість слід відзначити, що загальний вміст пігмент-білків СЗКІІ був вищим у рослин, які зростали в умовах низької інтенсивності (61,24 %) порівняно з вирощеними за високого освітлення (58,1 %). Збільшення кількості олігомерних (тримерних) форм та зниження рівня вільного хлорофілу, очевидно, зумовлені підвищенням стабільності світлозбирального комплексу [2], що сприяє кращому поглинанню світлової енергії та її передачі до реакційного центру.

Іншою відмінністю є зміна відносного вмісту пігмент-білкових комплексів антени ФСІІ — CPa. З таблиць 2 і 3 видно, що рослини за умов підсвічування червоним світлом на фоні як низько-, так і високоінтенсивного білого світла характеризуються вищим вмістом комплексу CPa, і, отже, більшою стабільністю.

Висновки

Отримані експериментальні дані засвідчують, що додавання низькоінтенсивного червоного випромінювання світлодіодів вузького спектрального діапазону до світлопотуку люмінесцентних ламп низької та високої інтенсивності спричинює зміни структурно-функціонального стану ФСА. Показано, що за умов підсвічування червоним світлом рослини характеризуються ефективнішою роботою ФСІІ. Це підтверджується зростанням рівнів фотохімічного гасіння (qP) та ефективного квантового виходу фотохімічних реакцій ($F'_{\text{v}}/F'_{\text{m}}$). Збільшення олігомерних форм СЗКІІ та пігмент-білків антени ФСІІ у рослин у разі підсвічування червоним світлом вказує на вищу стабільність цих комплексів.

З огляду на актуальність даної проблеми, зважаючи на стрімкий розвиток світлодіодів різних інтенсивності та кольору, які дають можливість змінювати спектральні характеристики штучних джерел освітлення і забезпечувати «концентрований» вплив у певних ділянках ФАР, а також базуючись на власних результатах, використання світлодіодів інших довжин хвиль та підвищення інтенсивності випромінювання має стати наступним етапом дослідження.

1. Астафурова Т.П., Верхотурова Г.С., Зайцева Т.А. и др. Влияние различного соотношения спектральных участков ФАР на фотосинтетический метаболизм растений огурца // Вестн. Башкир. ун-та. — 2001. — № 2. — С. 29—32.
2. Дьякова О.О. Дослідження пігмент-білкових комплексів хлоропластів перцю при інфікуванні вірусом тютюнової мозаїки // Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. «Приемы повышения урожайности растений: от продуктивности фотосинтеза к современным биотехнологиям». — Киев: Нац. агр. ун-т, 2003. — С. 78—80.
3. Протасова Н.Н. Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений // Физиол. раст. — 1987. — 34, вып. 4. — С. 812—822.
4. Протасова Н.Н., Уеллс Дж.М., Добровольский М.В., Цоглин Л.Н. Спектральные характеристики источников света и особенности роста растений в условиях искусственного освещения // Физиол. раст. — 1990. — 37, вып. 4. — С. 386—396.
5. Топчий Н.М., Сиваш О.О., Фомішина Р.М. Вплив світла різної інтенсивності та спектрального складу на пігментний апарат та функціональні характеристики хлоропластів гороху (*Pisum sativum* L.) // Укр. ботан. журн. — 2004. — 61, № 5. — С. 91—98.
6. Anderson J.M. P-700 content and polypeptide profile of chlorophyll-protein complexes of spinach and barley thylakoids // Biochim. Biophys. Acta. — 1980. — 591. — P. 113—126.
7. Arnon D.I. Cooper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenolase in *Beta vulgaris* // Plant Physiol. — 1949. — 24. — P. 1—154.
8. Bailey S., Walters R.G., Jansson S., Horton P. Acclimation of *Arabidopsis thaliana* to the light environment: the existence of separate low light and high light responses // Planta. — 2001. — 213. — P. 794—801.
9. Bilger W, Björkman O. Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in *Hedera canariensis* // Photosynth. Res. — 1990. — 25. — P. 173—185.
10. Chow W.S., Melis A., Anderson J.M. Adjustments of photosystem stoichiometry in chloroplasts improve the quantum efficiency of photosynthesis // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. — 1990. — 87. — P. 7502—7506.
11. De la Torre W.R, Burkey K.O. Acclimation of barley to changes in light intensity: photosynthetic electron transport activity and components // Photosynth. Res. — 1991. — 24. — P. 127—136.
12. Leong T.Y., Andersson J.M. Adaptation of the thylakoid membranes of pea chloroplast to light intensities. I. Study on the distribution of chlorophyll-protein complexes // Photosyn. Res. — 1984. — 5. — P. 105—115.
13. Leong T.Y., Andersson J.M. Adaptation of the thylakoid membranes of pea chloroplast to light intensities. II. Regulation of electron transport capacities, electron transport carriers, coupling factor (CF1) activity and rates of photosynthesis // Photosyn. Res. — 1984. — 5. — P. 117—128.
14. Maxwell K., Johnson G.N. Chlorophyll fluorescence — a practical guide // Journ. of Exp. Bot. — 2000. — 51. — P. 659—668.
15. Salvucci M.E., Ogren W.L. The mechanism of Rubisco activase: insights from studies of the properties and structure of the enzyme // Photosynth Res. — 1996. — 47. — P. 1—11.
16. Schreiber U., Schliwa U., and Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer // Photosynth. Res. — 1986. — 10. — P. 51—62.
17. Walters R.G., Horton P. Acclimation of *Arabidopsis thaliana* to the light environment: changes in composition of the photosynthetic apparatus // Planta. — 1994. — 195. — P. 248—256.

Рекомендує до друку
К.М. Ситник

Надійшла 08.07.2005

Н.Н. Топчий, А.А. Сиваш

Институт ботаники им. Н.Г. Холодного НАН Украины, г. Киев

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОГО АППАРАТА ГОРОХА (*PISUM SATIVUM* L.) В УСЛОВИЯХ ВАРИАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА В КРАСНОЙ ОБЛАСТИ

Исследовали влияние спектрального состава света на параметры индукции флуоресценции хлорофилла и содержание пигмент-белковых комплексов хлоропластов гороха (*Pisum sativum* L.), выращенного под люминесцентными лампами ЛБ-40 интенсивностью 60 и 310 мкмоль·м⁻²·с⁻¹, а также с добавлением красного излучения светодиодов ($I_{\max} = 660$ нм, $Dl = 20$ нм, 40 мкмоль·м⁻²·с⁻¹) к фоновому освещению люминесцентных ламп. Максимальный квантовый выход ФСII (F_v/F_m) листьев гороха, выращенного под белым светом разной интенсивности и при добавлении к фоновому освещению люминесцентных ламп красного излучения светодиодов, был почти одинаковым, однако более высокий эффективный квантовый выход (F'_v/F'_m) и уровень фотохимического тушения (qP) наблюдались у растений в условиях красной подсветки. Нефотохимическое тушение (NPQ и qN) у этих растений было ниже. Электрофоретические исследования позволяют заключить, что красная подсветка приводила к высшей стабильности светособирающего комплекса (СЗКII), о чем свидетельствуют возрастание содержания олигомерных форм СЗКII и снижение уровня свободного хлорофилла. Полученные данные показывают взаимосвязь между более высокой стабильностью СЗКII и уровнем нефотохимического тушения (qN).

N.M. Topchiy, O.O. Syvash

M.G. Kholodny Institute of Botany, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

STRUCTURE-FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF THE PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF PEA PLANTS (*PISUM SATIVUM* L.) IN CONDITION OF VARIATION OF SPECTRAL LIGHT COMPOSITION IN RED REGION

The influence of spectral light composition on the chlorophyll fluorescence parameters and pigment-protein content of pea plants (*Pisum sativum* L.), grown under «white» luminescent lamps LB-40 at the intensity of 60 and 310 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and under the same irradiation supplemented with red light emitting diodes (LEDs) ($I_{\max} = 660$ nm, $Dl = 20$ nm, 40 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) has been studied. Maximum quantum yield of PSII (F_v/F_m) pea leaves, grown under white light of different intensities and under the red-enriched light was almost identical, however, plants grown under red LEDs were characterised by higher effective quantum yield of PSII (F'_v/F'_m) and qP. Non-photochemical quenchings (qN and NPQ) in these plants were lower. The higher degree of State 1 - State 2 transition was observed in experimental plants. Electrophoretic investigations allow to conclude, that red addition resulted in higher light-harvesting complex (LHCII) stability, as indicated by increase in the amount of oligomeric LHCII forms and decrease in the level of free chlorophyll. The data obtained have shown the relationship between higher LHCII stability and non-photochemical quenching level, qN.